稻田土壤管理與施肥技術實務

江志峯

行政院農業委員會農業試驗所

E-mail:cfchiang@tari.gov.tw

摘 要

生產作物，一向以追求單位土地上及單位時間內獲得最高收益為目標。肥料的合理運籌要以全面提高群體質量為指標，以取得高產質優，並提高肥料的利用率和經濟效益。水稻合理施肥必然涉及其需肥量，高產水稻各生育時期的吸收百分率，水稻吸收營養元素的轉運與分配，肥料本身的釋肥特性。不同土壤、生態條件下不同類型品種水稻高產施肥的運籌模式和方法等問題，前人在這方面已進行廣泛的研究，取得極為豐富的研究成果，為制定施肥策略提供理論依據，並已於民國 61 年編印初版「施肥推薦手冊」至今，對增產有極顯著的作用，陸續已增修過六版。然而，自民國 80 年以後，我國水稻生產條件，發生很大的變化，對水稻施肥技術需要進一步的研究，以求發展與提高。本手冊主要介紹水稻的營養管理技術，著重於不同環境生態區肥料效應的比較，其目的乃根據目前各地區水稻的生產環境，綜整過去各試驗改良場所的水稻田間試驗資料，制定合理的水稻肥料施用技術，並據以增修訂區域性「水稻土壤與營養管理手冊」為最終目的，提供稻農應用。

關鍵詞：水稻(*Oryza sativa* L.)、營養推薦 (nutritional recommendations)
土壤管理 (soil management)

一、前言

世界上大約有 79,000,000 公頃灌溉條件下種植水稻。雖然這只是水稻栽培總面積的一半，卻約 75%的世界稻米年產量。在亞洲，近 1.38 億公頃的栽培水稻之 60%每年專門用灌溉生產。這種水稻常為單期作與兩到三個作物的栽培，主要決定於水的供應。其他稻田生態系統中，包括雨養低地（水稻總面積的 35%），以及高地和窪地生態系統（水稻總面積的 5%），其特徵是缺乏水分的控制，洪水和乾旱是潛在的問題，其收益率低，變化極大。

預期對水稻的需求將會再持續增加，主要是因為人口增長，特別是在亞洲，其人口到 2025 年預計將增加 35%（聯合國，1999 年）。水稻總產量的增加可能來自增加種植面積，提高單產和種植密度。然而，水稻種植面積的擴大，將受限於農地的都市化與土地轉換工業的利用。因此，在未來的稻米供應的增加必須從提高單產和種植的強度，特別是在灌溉稻田生態系統。

目前亞洲大多數稻農在特定地區所種植水稻的產量往往發揮不到其最大氣候與品種潛力的 60%，因此，當前稻米增產的空間還很大。主要的限因是農民為增產和獲益，對於生產資材往往是不當的投入（尤其是營養物質、種子、農藥等生產物質）和自然資源過度利用，即重視生產而導致生態服務減少。要滿足對糧食的需求，對日益缺少的自然資源的使用需得更有效率。更好的作物、營養、蟲害和水土管理措施，以及利用具有較高的增產潛力的種植資源，是可使水稻生產有利可圖，並供應合理價格給消費者。

1. 水稻生長環境與管理

1.1 生長條件

水稻(*Oryza sativa* L.)是世界最重要的糧食作物之一，它是世界二分之一人口生活的主食，提供約五分之一世界人口的主要熱量來源，尤其是亞洲，在我國亦為栽培面積最大的單一作物。亞洲種的水稻被認為有 5000 年的栽培歷史，歷經人類在多樣的水-土-氣候環境下之選拔或馴化，加上人類的散播，各種生態遺傳歧異極為豐富，適應性極廣，從北緯 53°到南緯 40°；從海平面到海拔 3,000 公尺；從深水到旱地皆可種植(Chang, 1976)。水稻一般種植於低地(lowland)地文環境，若種植於高地地區(upland)，也必須具備充足的水源，足夠供應水稻整個生育期的生長。

1.2 主要栽培品種

水稻一般可分為稉稻(Japonica)、秈稻(Indica)及爪哇型稻(Javanica)，稉稻分蘗較少，穀粒短圓，抗低溫環境，分布於溫帶地區，秈稻分蘗較多，穀粒細長，抗不良環境，分布於熱帶地區，爪哇型稻分蘗較少，穀粒較大，短圓有芒，不耐低溫，抗不良環境。日據時代以前台灣主要以秈稻栽培為主，在日據時代，引進的稉稻種植與改良，逐漸為大眾所接受成為現今以稉稻為主的飲食習慣與栽培品種，秈稻品種則為因應糧食策略僅在少數地區推廣種植。經育種人員的努力，台灣水稻品種種類眾多，常見優良水稻推廣品種如下：

食用稉稻品種：台稉 2 號、台稉 8 號、台稉 9 號、台稉 14 號、台稉 16 號、桃園 3 號、台農 71 號、台農 77 號、台中 192 號、台南 11 號、高雄 139 號、高雄 145 號、

花蓮 21 號、台東 33 號、台農 84 號。

一般食用秈稻品種：台中秈 10 號、台農秈 22 號。

加工用秈稻品種：台中秈 17 號、台中在來 1 號。

糯稻品種：台農糯 73 號、台中秈糯 2 號、台中秈糯 1 號、台中糯 196 號。

1.3 氣候

台灣地處亞熱帶，地形狹長，中央山脈橫貫南北，氣候在季節風(monsoon)籠罩之下及南北長距離之緯度差異，產生不同氣候型態，北部冬季面對東北季風涼冷而多小雨，秋季晴天較多，年雨量比較均勻，南端跨入熱帶，且無高山阻擋維護平地，夏季西南季風直入，十月至五月中以前為旱季，五月中至九、十月為雨季，五月中至六月中前後全省為梅雨期，一般南部雨勢較北部大，夏季及其前後常有梅雨，七月至九月偶為五月至十一月上旬為颱風期。整體上，雨水豐沛，高溫多溼，極適合稻的生長。本省水稻栽植時期，按地理區域而有差異，各區一期作初期育苗或插秧不久後遇低溫，但不影響產量。直至收穫，氣溫影響產量之因子大抵可以忽略。二期作栽培期間，氣溫、水溫皆高，常超過 35℃，故對於水稻根之發展、養分吸收、分蘗數、開花、稔實率等影響甚大，進而影響產量。在北部區域二期作之末期，則常有低溫出現，除了影響養分吸收與轉運外，光合作用產物之運送亦然。農試所於 1991 年，依照溫度、雨量、日照、收穫期的低溫與區域性的季風等氣象因子所繪製之一、二期作水稻氣候生態區域圖 1，大致依其為區域劃分於西部地區進行不同氮肥等級田間試驗，約略可瞭解氣候對於水稻產量的效應。稻穀產量與土壤及氣候等環境因子關係密切。水稻為喜溫型作物，氣溫與施氮量對水稻產量之影響，如圖 2 和表 1 所示，大致呈現一期作的平均稻穀產量高於二期作，南部地區尤其明顯。

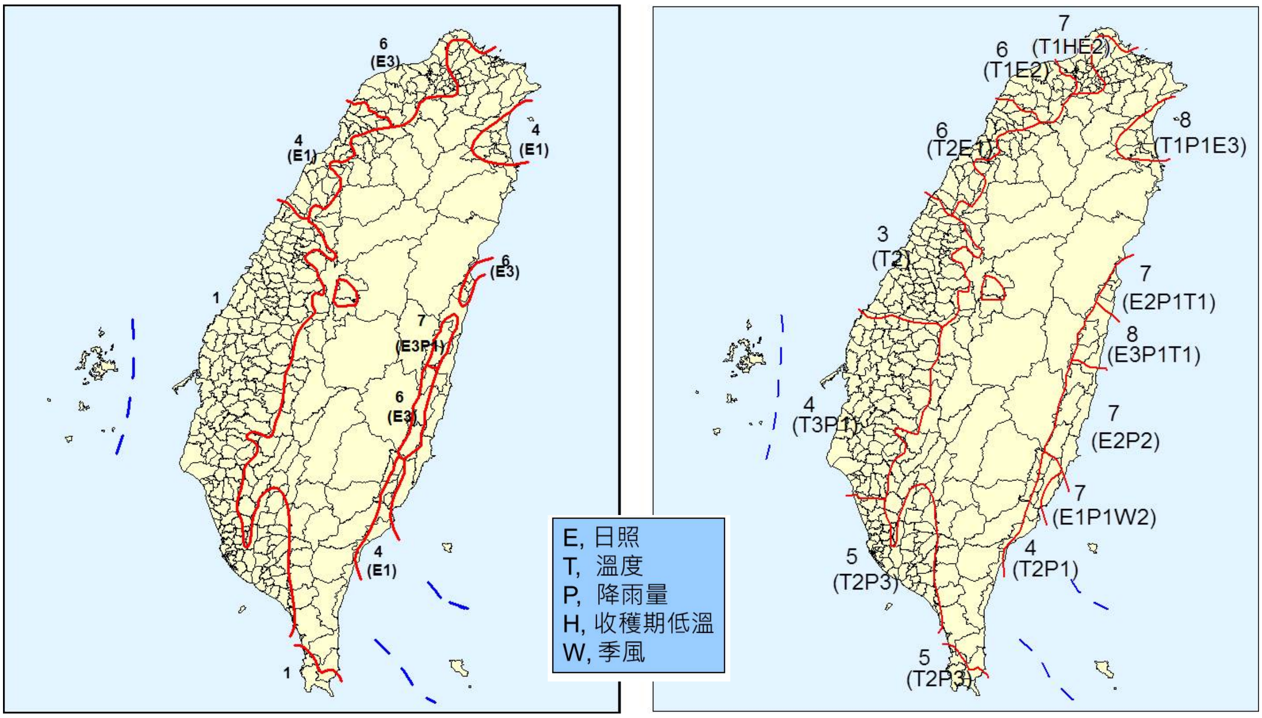


圖 1、一期作(左)、二期作(右)水稻氣候生態區域圖

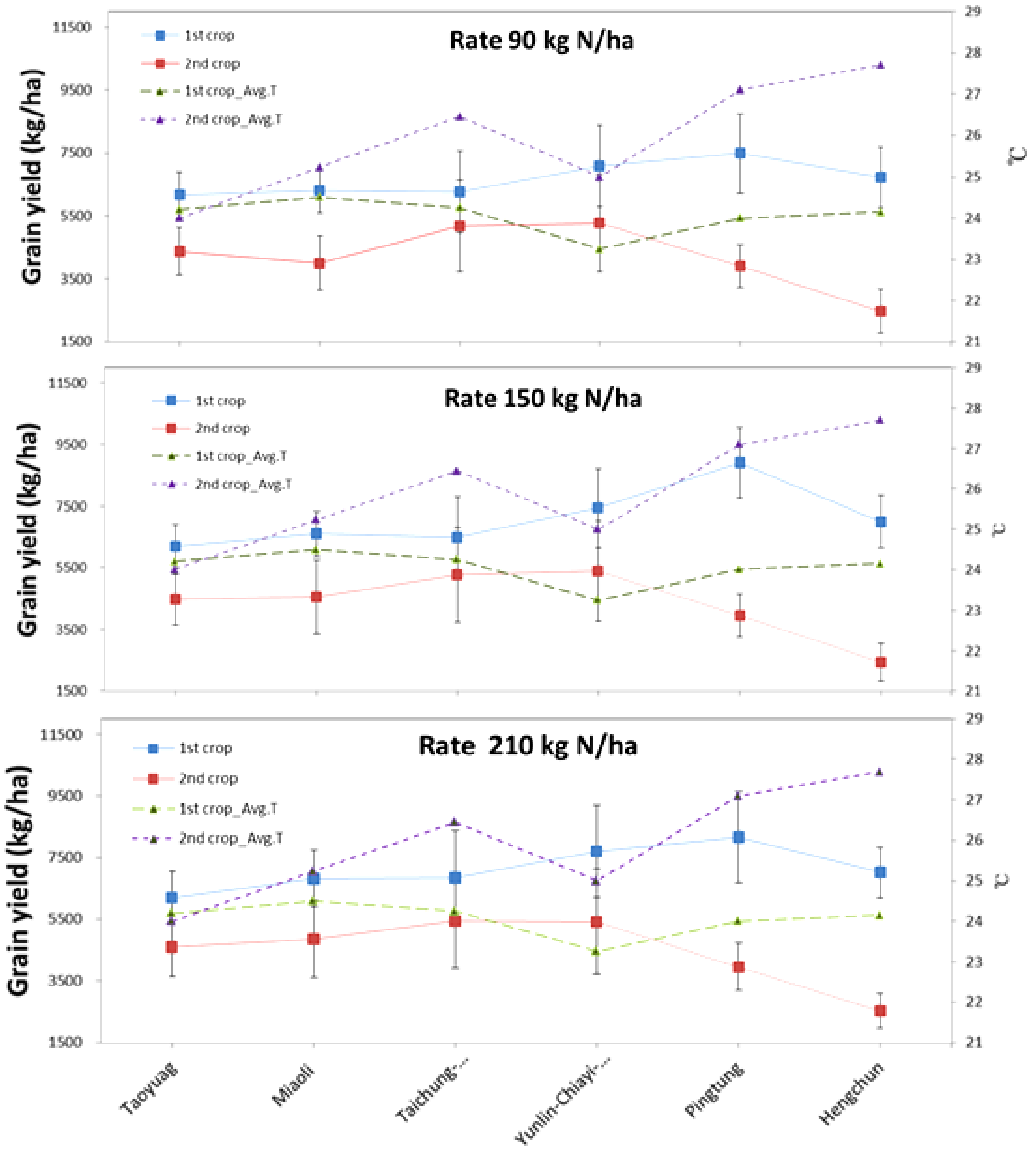


圖 2、不同氣溫對於水稻產量的效應(江，2012-2013)

1.4 土壤管理

氣候特殊而且區域差異明顯外，土壤亦甚複雜，氣候影響土壤化育，進而影響土壤對植物養分固有的供應力，若缺乏關聯作物-氣候-土壤三者間之試驗或調查探討試驗結果，無法適用不同的個別環境，所推算之產量，亦難與實際產量一致，故推薦的施肥量的精確度也會降低，此為土壤管理組歸納劃分的意義（如圖 3）。為加速修正肥料推薦手冊的進程，乃暫以年度田間試驗資料，以氣候生態區為歸納基礎，將不同地區及土壤，先分不同水稻品種與氮肥等級的產量資料，整合各單點試驗產量資料與其相關的程度，並探討環境、氣候、灌水及土壤各種性質與水稻產量之關係，據此所得結果用以推定地區、氣候各種土壤性質，對水稻產量之影響，研定各種氣候環境及土壤性質對水稻產量影響之輕重等級，在不同田間水與施肥的管理措施下進一步修正區域性水稻施肥推薦手冊。

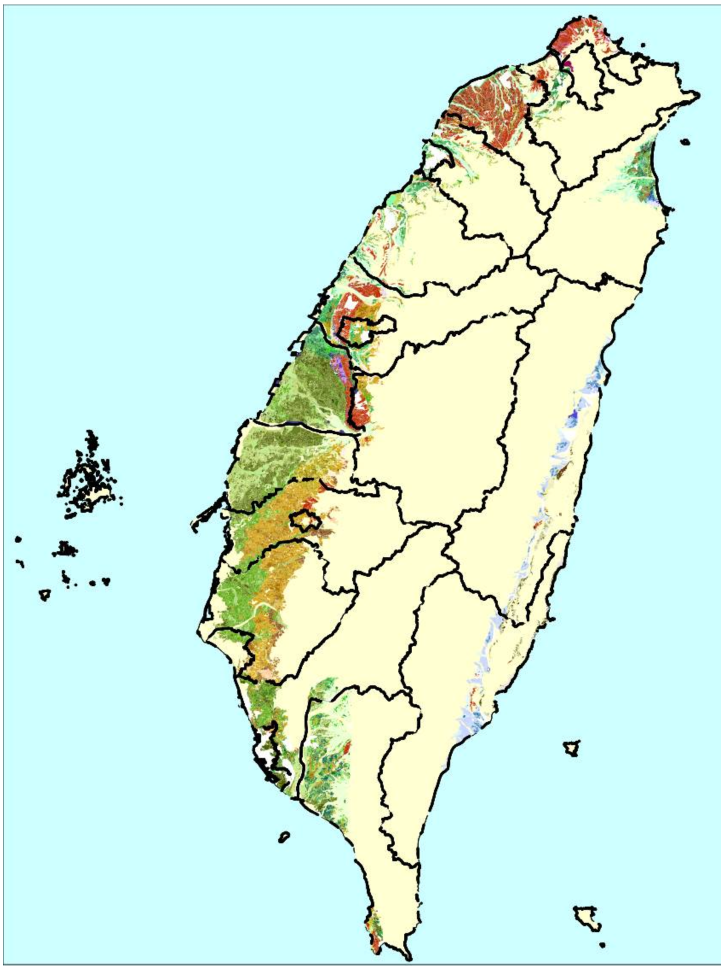


圖 3、土壤管理組分布圖

1.5 水分管理

目前我國水稻的種植於低地的灌區或者非灌區處，灌區水稻的種植主要來自渠道灌溉(圖 4)，為配合已重劃水稻專區的生長時期，由水利單位調配水源，非灌區的灌溉農民除依靠降雨外，一般均鑿井灌溉 (圖 5)為主。約 75%的全球水稻產量來自灌溉水稻系統，因為大多數水稻品種在水供應充足時，能表現自己的產量潛力。一期作插秧初期在較冷的地區，水也可以作為熱保持媒介，並提供水稻生長比較溫和的環境。高水位管理，大多是在溫度高蒸發散量大且水稻對水的需求是最大時採行。

1.6 作物管理

大部分作物管理的措施均會影響作物對優化養分管理的反應，應注意的要點：

- 使用具有適合高產潛力的優質種子。
- 在我國水稻的育苗大多先以種子剛發芽時撒播於育苗盤，再移置秧苗田中，秧苗期間視氣候以浸水與排水的水分管理方式調控秧苗生育。
- 期作間的不同，秧苗於育苗田生長約 10-20 天後，以插秧機移植到本田。
- 適當平整土地並保持整個農田適宜均勻的水層，使水稻生長勢一致，可減少用水總量。
- 選擇種植的合適密度，建立高效的冠層，通常行株距為 30 x 24 或 30 x 21 或 30 x 18 cm，保持 20-40 穴/m^2。
- 避免雜草與水稻競爭空間、水分、陽光與養分。

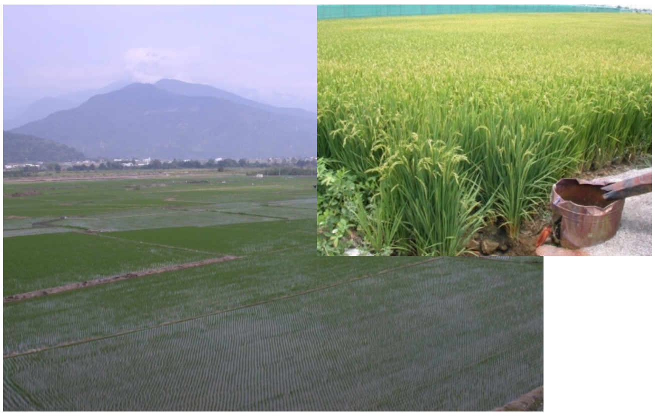


圖 4、灌區低地稻田的生產生態稻田圖　　5、非灌區旱地充足灌溉(抽取地下水)

1.7 病蟲害管理

病蟲害藉由破壞葉片冠層、莖稈和籽粒從而影響優化養分管理時對作物生長所發揮的效應。灌區低地水稻最常見的病蟲害有稻熱病、紋枯病、白葉枯病、螟蟲、褐飛蝨、鼠害與鳥害。其管理的重點：

- 使用能抵抗常見病蟲害的品種。
- 避免過量施氮，防止葉片徒長誘發病蟲的發生，施用氮肥前，評估作物生長狀況，葉片顏色(使用色板)和病蟲害發生頻率。
- 缺鉀水稻在氮肥用量過多和鉀肥施用不足下會引起多種病害，導致更大的損失，與其他農民合作實施綜合蟲害管理。
- 高效施用氮肥和平衡營養可使倒伏和病蟲害發生的風險降至最低。

1.8 產量與差額

生長期間能保持灌溉水一段時期為水稻生產的基本需求，因此，土壤耕底層應有不透性的硬盤或黏土盤幫助留住水。地區性水稻產量歉收的定義乃指水稻生產潛能與農民管理收量之間的差異量，生產潛能是指僅受氣候和品種的影響，而其他因素處於最佳水準時的產量。由於受氣候影響，最大產量在不同年份之間會出現波動 (±10%)。傳統的秈稻品種的潛能產量為 5 t/ha，混雜粳和高產量秈稻品種的潛能產量為 10 t/ha。粳稻品種的潛能產量為 15 t/ha，混雜粳秈稻品種的潛能產量為 18 t/ha。以灌溉型生態系的水稻產量而言，熱帶與亞熱帶氣候區兩者間潛能產量的差異為 4-6 t/ha，而看天型生態系則為 2-3 t/ha，其中兩者差異在於看天型生態系的降雨不穩定和排水不良，當地農民仍繼續用傳統的栽培品種，及投資成本不能完全回收的不確定性。熱帶與亞熱帶地區灌溉型生態系的水稻產量差異的比較，如圖 6。因對土壤條件之要求不嚴苛，台灣較平坦的耕地幾乎全可栽種水稻，圖 7 為台灣地區民國 101 年兩期作水稻利用覆蓋圖。水稻的栽培環境並不嚴苛，但豐歉與否的產量變異大。農民需要理解一些特殊措施對生產力、收益率以及同時克服某些限制因子後所引起的綜合效應的影響，例如，病蟲害問題可通過更適宜的養分管理減輕，推薦施肥策略可以基於可達到的產量目標來建立，在作物歉收的風險最低的情況下實現高產和高收益。

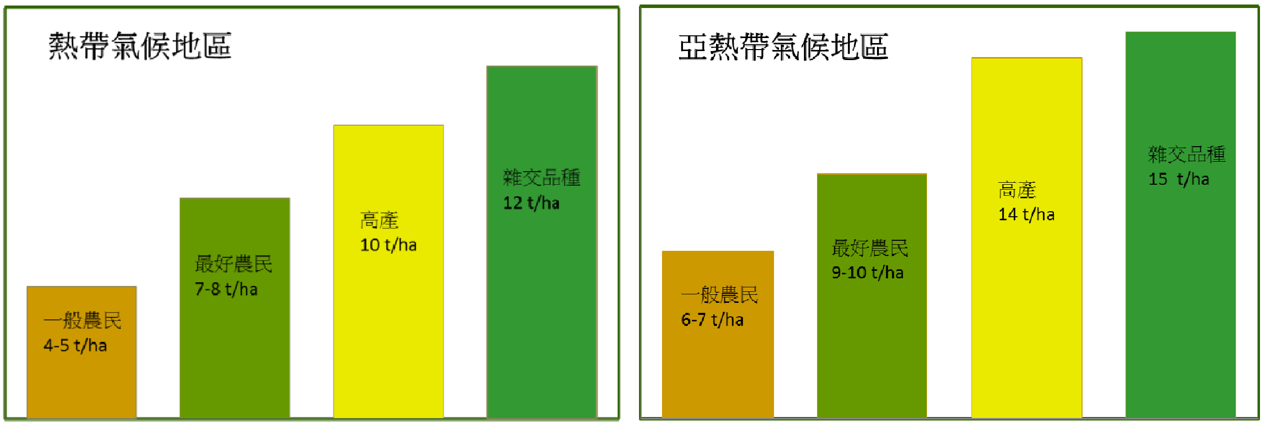


圖 6、不同生長區域與不同氣候條件下水稻平均產量(轉繪自 Nutritional recommendations for rice, Haifa pioneering the future)

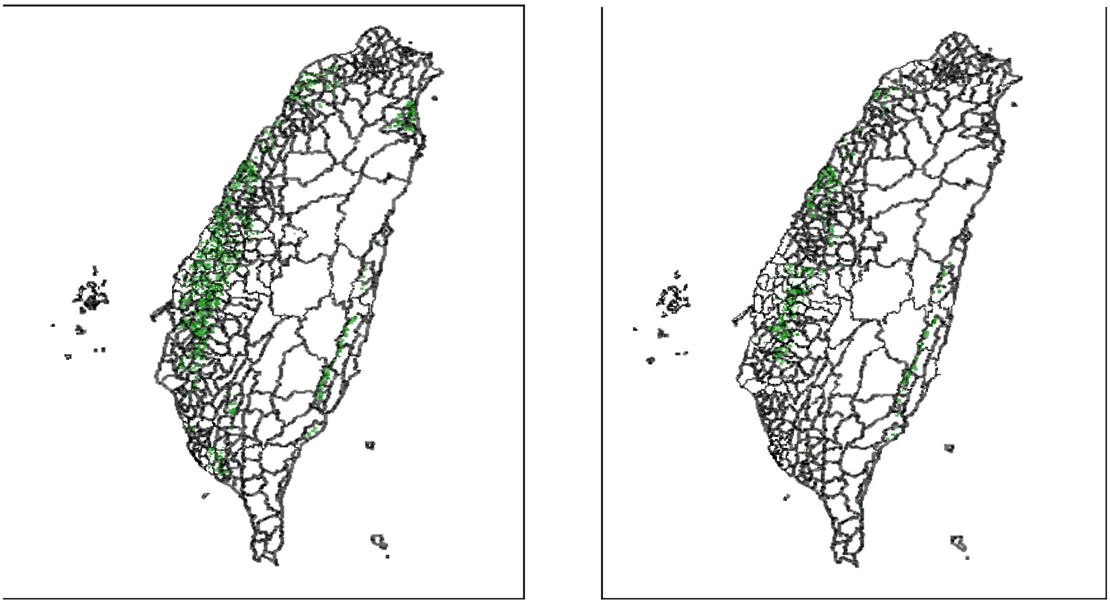


圖 7、101 年水稻兩期作水稻利用覆蓋圖，左：一期作(1st crop) 右：二期作(2nd crop)(資料來源：農業試驗所農化組土壤調查研究室)

民國 101-103 年進行的田間試驗資料顯示，我國水稻期作間各地的稻穀產量存著變異，如表 1 所示。

表 1、101-103 年不同水稻 25 個栽培品種與氮肥等級之平均稻穀產量變異(江，2016)

Years	Season	Average grain yield (kg/ha)	Standard deviation (sub-national variation)
101	1st Crop	6946	1651
	2nd Crop	5205	1792
102	1st Crop	6365	1404
	2nd Crop	3947	920
103	1st Crop	7535	1447
	2nd Crop	6062	1564

1.8.1 肥料利用效率指標

肥料的高利用率主要的表現為：

- 施用的肥料大部分應被作物所吸收(稱為養分回收率，RE)。
- 每公斤肥料的施用會有較大幅度的增產(稱農藝利用率，AE)。

RE(%) = [施氮肥後作物成熟期地上部吸收氮量−不施氮肥後作物成熟期地上部吸收氮量(公斤/公頃)]×100/氮肥用量(公斤/公頃)

AE(%) =[施氮肥區稻穀產量－不施氮肥區稻穀產量(公斤/公頃)] ×100/氮肥用量 (公斤/公頃)

如要使養分回收率和農藝利用率達到最大，須注意以下幾點：

- 確定養分投入量時，要考慮土壤養分供應量；
- 平衡供應作物所需各種養分；
- 肥料施入作物吸收利用效率最高的土層中；
- 氮肥的施用根據作物生長期間的氮營養狀況而定，可使葉色卡確定植物的氮營養狀況；
- 選擇適宜品種的高質量種子；
- 進行全面且高標準的作物管理；
- 應用綜合的蟲害管理技術來控制病蟲害。

2. 土壤養分供應與營養平衡

水稻所需的養分除碳、氫、氧外大部分來自土壤，土壤中供給養分多時，則減少施肥量；土壤中供給養分量少時，應增加肥料施用量。故應瞭解土壤中肥力及提供水稻生育期養分吸收量，以靈活調節肥料施用量。

2.1 浸水土壤化學性質的改變

2.1.1 浸水土壤之酸鹼度(pH)及其對肥力之關係

從土壤肥力觀點而言，對水稻最適 pH(由浸水土壤之溶液所測得)約為 6.6。在此 pH 時，土壤有機質之氮(N)與磷(P)礦化釋出，以及磷的有效性均最高。微量要素銅(Cu)、鋅(Zn)溶解度大、有效性高、鉬(Mo)則隨 pH 增高有效性也提升。鐵(Fe)、鋁(Al)、錳(Mn)有效性降低而減輕毒害發生的可能性及有機酸會降到毒害限度之下。浸水土壤之管理應該在水稻移植時致使其 pH 達到 6.6，且至少維持此水準直到開花開始時為止。

2.1.2 土壤 pH 與鈣(Ca)、鎂(Mg)、鉀(K)濃度關係

浸水土壤之 pH 增高，此時土壤中交換性鈣、鎂含量與 pH 成正相關，但交換性鉀則呈負相關，故強酸性水稻田土壤特別要注意鉀對鎂之拮抗作用。亦即鉀肥超施時，容易引起缺鎂的問題。

2.1.3 氧化還原電位(Eh)與土壤肥力之關係

氧化還原電位影響：1.土壤氮的含量，2.磷與矽(Si)的有效性，3.直接影響 Mn^{2+}與 SO_4^{2-}的濃度，間接影響 Ca^{2+}、Mg^{2+}、Cu^{2+}、Zn^{2+}、MoO_4^{2-}的濃度，4.有機酸及硫化氫 (H_2S)之產生。

●**土壤氮的水準**

在浸水數日內，大量原存的或施入的硝酸態氮(NO_3^-–N)，因脫氮作用而損失。肥料撒施於地面，溶出之銨離子(NH_4^+)或土壤中向上擴散至高 Eh 處之 NH_4^+會迅速因硝化作用而變成硝酸根離子(NO_3^-)。此 NO_3^-因質流 (mass flow)及擴散至嫌氣土層，而起脫氮作用。所以浸水土壤不宜施用硝酸鹽肥料。在水稻根系處放置 NH_4^+鹽肥料，可使水稻對氮的利用增高。以銨態氮型態存在於土壤中，對土壤肥力是有益的，因為淋失及脫氮之損失都比 NO_3^-為少，與有氧土壤比，浸水土壤中的水稻通常具有更多的氮可供使用。

●**磷與矽之有效性**

土壤中原存之磷及施入之磷的有效性，是隨浸水而增高。在酸性土中，磷之有效性增高，是與氧化還原電位之降低或 Fe^{2+}濃度之增高有關。土壤中被 Fe^{3+}所固定的磷，是由於之鐵磷酸鹽被還原，或由於 pH 之提高伴隨土壤的還原。

矽雖為土壤的主要成分，可溶性卻低，作物可利用之矽僅為其弱酸可溶之部份，因土壤間弱酸可溶之有效矽含量有很大的差異。禾本科作物如水稻、甘蔗之矽需求量大，故有效態矽含量低之土壤常可因矽酸肥料施用而改善，顯示土壤中有效態矽含量亦與土壤生產力有關。土壤中有效矽含量之測定遂為土壤肥力測定上之一個要項。我國強酸性土壤較易缺矽，砂頁岩質稻田以 40 mg/kg 為需否施用矽酸爐渣之基準，紅壤稻田則為 90 mg/kg。

●**水溶性 Fe^{2+}及 Mn^{2+}之濃度**

當土壤處於浸水狀態，其中鐵及錳之氧化物被還原，而有大量之 Fe^{2+}及 Mn^{2+}進入溶液中。水溶液 Fe^{2+}濃度之增高不僅免除了鐵之欠缺，且抑制酸性土壤中之錳毒害，但在強酸性土中，因鐵氧化物多，太多的 Fe^{2+}，可能對水稻生長不利。

●**硫酸鹽之還原**

在浸水四至六週以內，正常的近中性的土壤中，一部分溶解性 SO_4^{2-}會還原成硫化氫，而產生毒害。

SO_4^{2-}之還原成 H_2S，對浸水土壤的肥力有實際上的影響：(1)如土壤含 SO_4^{2-}甚低，可能會出現硫的缺乏，尤其是施用不含硫的尿素氮肥時，(2)如土壤中活性鐵甚低時，例如砂質土，泥炭土及某些酸性硫酸土，硫化氫可能妨礙根養分吸收，或毒害水稻，(3) H_2S 可能降低銅與鋅之有效性。

●**醱酵作用**

浸水過久時，嫌氣性細菌進行醱酵作用，而產生較廣泛的有機物質種類，如脂肪酸，脂肪酸的出現會對水稻造成毒害。其他低電位還原環境中有機質之分解所產生之硫醇類、有機硫化物、H_2S 及甲烷(CH_4)等，也對水稻造成毒害。

土壤浸水所引起的氧化還原電位降低及其對土壤化學的及物理化學的影響，有正負兩面。其益處包括(1)增加氮、磷、鉀、鐵、錳、鉬之植物有效性，(2)降低錳及鋁之毒害。其不利的影響為(1)氮因脫氮作用而損失，(2)減低硫、銅、鋅之有效性，(3)產生某些妨礙作物吸收養分或直接對作物造成毒害的物質。

2.2 營養元素缺乏症狀出現的類型

對於目前定義的 17 種必須元素而言，包括：

(1)在作物體內移動性高的要素：

- 氮
- 磷
- 鉀
- 鎂

缺乏的症狀容易出現在老葉，因大部分的這些要素易轉運至新葉。

(2)在作物體內移動性慢的要素：

- 鈣
- 鐵
- 錳
- 鋅
- 硫

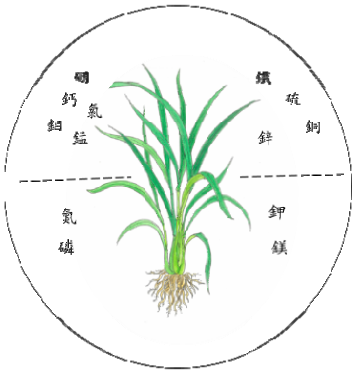
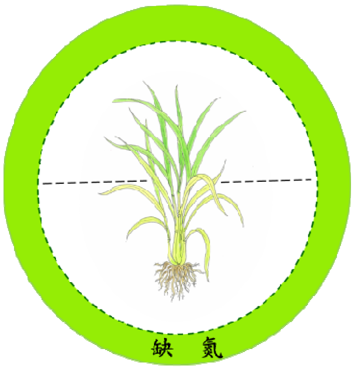
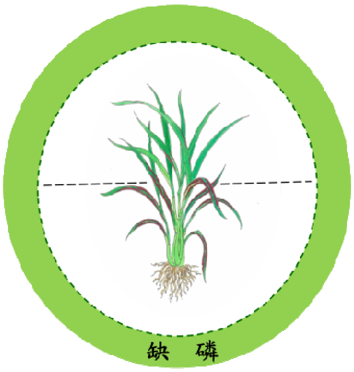
缺乏的症狀容易出現在新葉。

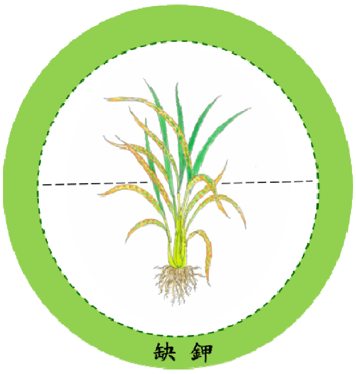
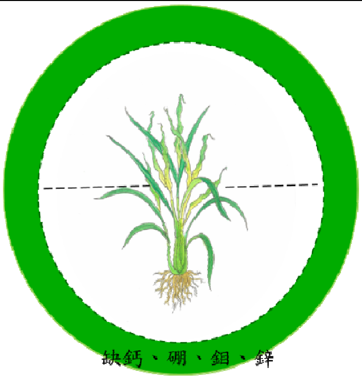
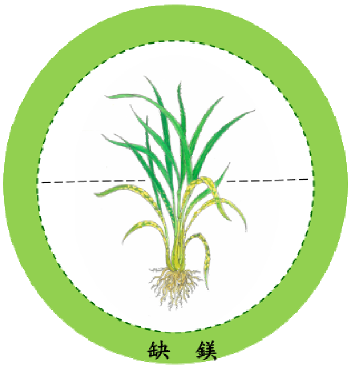
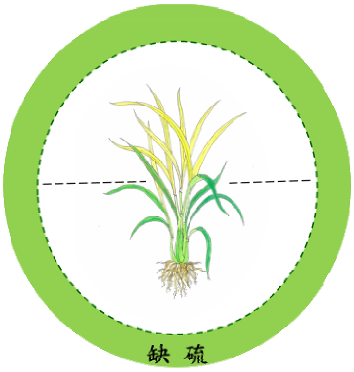
2.3 水稻缺乏營養元素之外觀形態特徵

在綠色革命的早期，產量的增加主要依賴於氮肥的施用，也通常會有明顯的肥效。由於受到氮肥增產效應的激勵，農民為了獲得高產通常施用過量的氮肥，而磷鉀肥用量較少，這導致不平衡的養分供應。而且，隨著目標產量的增加，以往不限制作物生長的養分現在變成增產的限制因素。值得注意的是施肥中養分的最佳 N：P：K 比例因不同田塊而異，取決於欲達到的產量目標和每一種土壤養分的供應量。

一般而言，作物收穫後，殘留於土壤中的氮、磷與鉀三種元素的量，不足以培育後期所需，故必須施用肥料以補充之。因土壤母岩不含氮，氮對於水稻的營養甚為重要，缺乏時對於水稻的收量減少極為明顯。氮缺乏症狀常先出現於較老的器官或組織，並遍佈全株，長期缺乏則莖短而細。其他營養元素缺乏時的症狀特徵，可歸納如表 2 中示意圖。

表 2、各種營養元素缺乏外觀示意圖

		
缺乏各營養元素部位	缺氮外觀症狀位於下位葉出現黃化，氮不足時植株生長矮小，分枝分櫱少，葉色變淡，呈淺綠或黃綠，色澤均一，尤其是基部葉片。	缺磷外觀症狀位於下位葉(老葉)出現紫紅色。

		
缺鉀的徵狀都先發生在老葉。葉緣及葉尖處出現白、黃或橘色的點或條紋，繼而發生褐變或壞死。	四種營養元素的缺乏症狀出現在幼葉，幼葉發病基部黃化，使葉片展開不完全，出現前端展開而中後部折合，出葉角度增大的特殊形態。	水稻缺鎂症狀先出現在低位衰老葉片上，缺鎂症大多數在生育後期發生，病葉從葉枕處成直角下垂。
		以上示意圖摘自水稻營養元素缺乏（農業試驗所, 2016）
水稻缺硫上位部葉片黃化。缺硫生長受阻，尤其是營養生長。	水稻缺鐵錳葉脈間黃化，葉脈仍保持綠色，症狀越近心葉越重。	

2.4 水稻營養要素管理

2.4.1.氮

氮可增加植株高度、穗數、稻葉大小、一穗粒數、稔實率，大大的決定稻穀生產的能力。穗數受營養生長期分蘗數的影響，而一穗粒數和稔實率則決定於生殖生長期的發育，氮的收穫指數(NHI)與收穫指數(HI)間呈直線相關，如圖 8 所示，但施氮肥過多容易造成病蟲的危害，以及生長植株倒伏。一般氮肥的施用採分施的方式，經驗豐富的農民則能配合植株的生育所需而調整施用。目前亦可使用色板於生育期間判斷氮的缺乏與否而決定是否補施氮肥 (圖 9)。

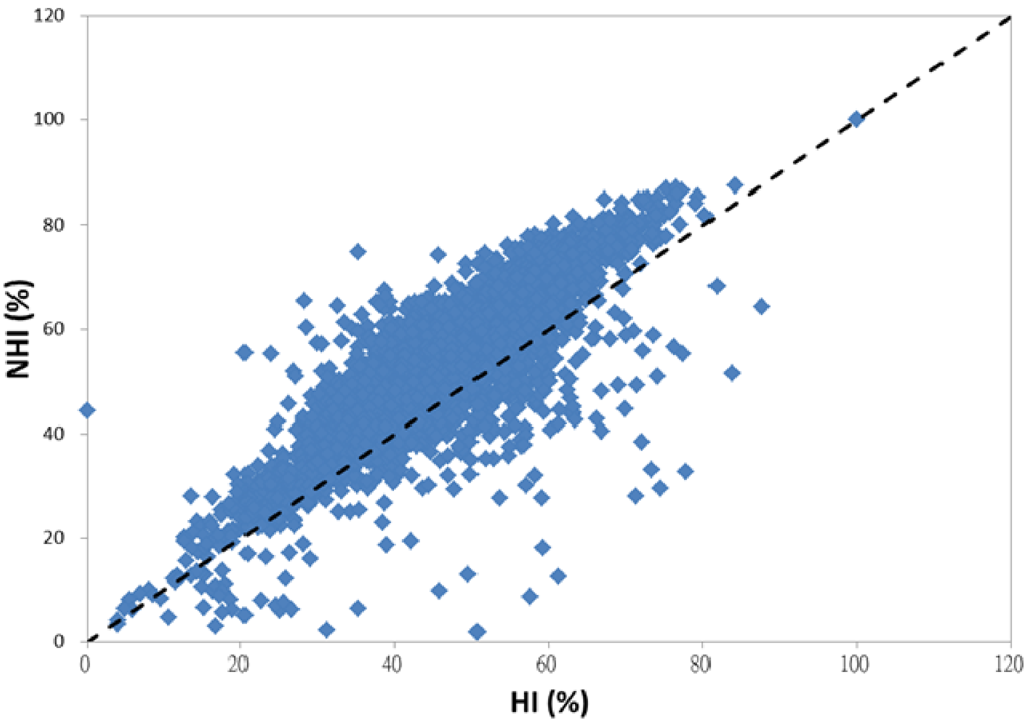


圖 8、水稻收穫指數(HI)與氮收穫指數(NHI)的關係

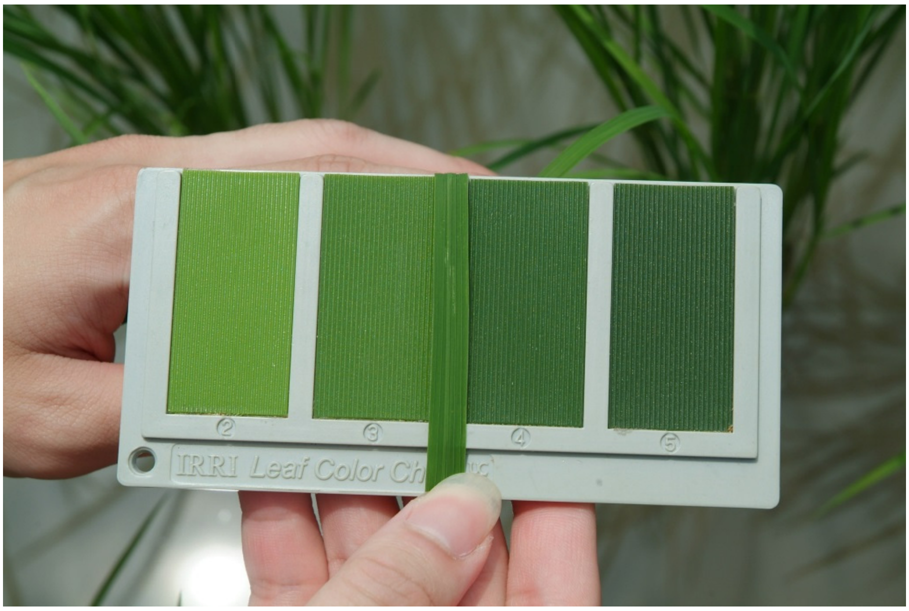


圖 9、水稻分蘖期以色板觀測稻葉顏色，以決定氮肥的施用

2.4.1.(1) 氮缺乏發生條件與改善方法

氮為蛋白質中胺基酸及葉綠素的成分。氮缺乏時的徵狀為生長受阻，主根長卻無側根，發育不良，葉片小而硬(圖 10)。作物缺乏氮時，會使其生育停止，葉綠素之生產減少，莖葉皆成為淡綠色，當欠缺更甚時，則會發生萎黃化。可能發生於土壤肥力貧瘠、土壤酸鹼度過高(pH 值 7.0 以上)的環境。土壤酸鹼度過高時所施用的氮肥易揮散，氮肥施用量不足、施用碳氮比過高的未腐熟堆肥及遭大量雨水或灌溉水淋洗的粗質地土壤，也是水稻缺乏氮的原因。

氮被認為是影響高產水稻栽培種生長發育的主要因子。在浸水的稻田銨態氮(NH_4^+-N) 濃度被認為高於硝酸態氮(NO_3^--N)而為水稻氮主要吸收型態。研究顯示在水稻根圈進行硝化作用，低地水稻吸收根圈硝化形成的 NO_3^-效果非常好。NO_3^-吸收速率與 NH_4^+相當，其量約佔水稻吸收總氮量的三分之一，因此，對低地水稻而言，儘管土壤中以 NH_4^+佔優勢，但在根圈的吸收利用氮的型態是混合的型態，對於水稻獲取氮而生長，可以於適當時機由 NO_3^-促進 NH_4^+吸收增加。

圖 10.1、相同生長期缺氮(左)與正常 (右)的植株

圖 10.2、缺氮植株稻葉外觀呈淡綠色

(資料來源 Haifa pioneering the future http://www.haifa-group.com/knowledge_center/crop_guides/rice/mineral_nutrition_recommendations/)

2.4.1.(2) 氮過量發生條件與改善方法

氮過量時易造成植株生長旺盛，葉片大而薄，莖葉軟弱，生殖生長延遲，抗病蟲害能力降低。水稻栽培時，氮之過剩則不如使其稍感欠缺，因米的品質會較好，但對收量則有影響。可藉由減少氮肥施用量，土壤中氮肥含量過高時，可由生長期中曬田除去過量之氮及酌量提高磷及鉀肥的比例用量等管理措施加以改善氮肥過量之問題。

2.4.1.(3) 氮肥利用效率

氮肥施用於低地水稻田間將會因為發生 (1)氨的揮失(2)脫氮作用(3) 淋洗作用及(4) 逕流而損失，減少氮肥利用率。低地稻田氮肥回收率很少超過 30-40%，目前最好的改善方法乃根據水稻需氮的高峰期而調整施氮的時機，或者施用控釋型肥料，使氮分期釋出。

其他施肥技術的要點包括 (1)氮肥儘量施用於土壤還原區域(氮肥深施),(2)絕對不於基肥時，施用硝酸態氮肥，而對水稻生長期間的表施氮肥，銨態氮肥與硝酸態肥可能具相近的利用效率，因為已全面建立的水稻浸水系統，能快速地吸收在淋洗入還原層的氮而避免硝化作用。

2.4.1.(4) 浸水稻田早期氮肥的施用與管理

根據浸水土壤氮肥效的研究，指出水稻在 4-5 葉片數前氮肥的施用，即為初期氮肥(65-100%)施用技術，氮的型態應是銨態氮，此時稻田是在乾的水分狀態，其最終稻穀收穫時的利用效率最高，稻穀產量也最高 (表 3)，施用後儘可能於五天內充分的灌

水且維持浸水狀態，以乃保護氮不至於因氨揮失或硝化作用後產生的脫氮反應造成氮的損失。初期氮施用後浸水至少保持三星期，確保植株對氮的最高吸收率(表 4)。

表 3、水稻施氮肥時預先浸水的時機、土壤水分境況的效應

施肥前浸水的時間(天)	土壤水分境況	吸收氮量(kg/ha)	氮肥利用效率*(%)	稻穀產量(kg/ha)
10	乾	95	71	6255
10	濕潤	52	42	5145
5	乾	112	82	6507
5	濕潤	80	59	5296
0	乾	120	83	6659
0	濕潤	76	64	5599
0	浸水	41	31	3783

*:4−5 葉片階段施用 130 kg N/ha
資料來源轉譯自: Norman, et al., 1992. p. 55-57. Ark. Soil Fertility Studies 1991. Ark. Ag. Exp. Sta. Res. Ser. 421

表 4、尿素施用後不同時間的氮肥利用率

氮肥施用時機	施肥後採樣週期(天)	植株吸收的氮(%)
預先浸水:尿素施用於乾土表面，隨即再浸水	7	11
	14	27
	21	63
	28	65
生長季間:尿素施用於浸水中	3	70
	7	67
	10	76

資料來源轉譯自: Wilson, et al., 1989. SSSAJ 53:1884-1887

2.4.1.(5) 浸水前的一次施用或採分施的施肥分配較好？

美國密蘇里州於田間的試驗，其結果如表 7 所示，結果顯示並無確定性答案。比較新品種水稻的產量，氮肥總量於浸水前一次施用相對於分成兩次或三次施用，有時產量較高，而它們的效應則決定於氮肥施用量等級與施用時機。

表 7、氮肥施用時機

浸水前施用量		季中浸水施用量		季中過後七天施用量		產量	
(lbs/A)	kg/ha	(lbs/A)	kg/ha	(lbs/A)	kg/ha	(Bu/A)	kg/ha
90	100	30	34	30	34	119	6,003
90	100	60	67	0	0	120	6,053
105	118	45	50	0	0	118	5,953
60	67	45	50	45	50	110	5,549
150	168	0	0	0	0	107	5,398

如用乾田種植而延遲浸水栽培的系統生產水稻，水稻生長至 15 至 20 公分高前，不需要建立固定性的浸水系統。為避免脫氮作用，提高氮肥利用率，適當的氮肥施用方法，至少總氮量的 50%應在固定性的浸水系統形成前立即施用，而剩下的量則於過後 10 天節間 1.2 公分時的伸長期施用。

2.4.1.(6) 水稻最需氮的生長階段

水稻氮肥的施用效應尚無大規模的地區性田間試驗結果，依過去日本試驗場(木村，1945)的試驗，不同試驗區不同的氮濃度，將氮對水稻不同生長時期之稻穀部分生產能率的結果可知，生產能率(內部利用效率)高的時期，在供應氮濃度低時，係在自最盛分蘗期至幼穗形成期期間內，換言之，即在將轉變為生殖生長之前呈現。但若供應氮濃度在 2.0-12.4 mg/kg 時，約在生長旺盛之分蘗期呈現第一次，在幼穗形成期前後呈現第二次。倘若供應氮濃度更高時，則只有營養生長期之初期，呈現一次生產能率高的時期，其後生產能率皆低。

由無效分蘗期供給氮量與稻穀之產量之關係，顯示氮量少較氮量多時，生產量可較高。其原因具認為乃由於氮過多能造成莖葉過度繁茂，反而使受光之態勢不良，而降低其生產力的關係。

幼穗形成期以後之氮對稻穀之生產有極大的作用，尤其是供應氮量少的時候更明顯。生長期之第二次高峰之出現，約在抽穗前 16-17 日，即是幼穗肥的施用適期。

水稻基肥係構成植物體之基本要素，因一般水稻多在供應氮濃度 2.0-12.4mg/kg 的條件下栽培，因而分蘗期之追肥對稻穀生產發生效用。在氮量少時，則幼穗形成期之穗肥最能使稻穀生產能力提高，開花以後之追肥，對稻穀生產有時亦有作用。

因肥料施用時期對作物的生育及產量有極大影響，且受土壤條件，栽培法及氣候等而異，故因地域的不同可得不同的成果。

2.4.1.(7) 水分管理與產量對氮反應

氮肥施用時機之田間試驗(Bollich and Linscombe, 1992)顯示，水稻種植時同時施肥的效應較施用前或施用後浸水為高(表 5)，施肥時若為浸水狀態結束時，對氮肥因揮失作用或脫氮作用之損失量也會愈少(表 6)。

表 5、施肥時機對產量的反應

施用方法/時機*	稻穀產量(kg/ha)**
插秧前	7,548
施用前浸水	6,124
施用後浸水	5,778

*:每一處理施用 100 kg N/ha**:稻穀產量為三年平均

表 6、施肥於乾的種植田的產量反應

氮肥施用時機	產量(kg/ha)	產量損失率(%)
浸水 9 天後施用	7,415	8
浸水 6 天後施用	7,525	7
浸水 3 天後施用	7,559	6
施用當天浸水	8,117	--
施用 3 天後浸水	6,484	21
施用 6 天後浸水	6,140	24

用氮肥培改善產量，田間試驗的氮肥反應，當分別施用 25 和 50 kg N/ha 時分別生產出 28.4 和 18.9 kg/ha 稻穀 (表 7)，產量的增加多寡受品種、土壤氮供應量、生殖生長期輻射量、以及管理的措施，如雜草控制與栽培密度影響。

表 7、氮肥對平均稻穀的反應

品種	氮施用等級 kg/ha	平均氮反應	
		稻穀產量 (kg/ha)	稻穀產量/施氮量 (kg/kg)
San Miguel INTA	25	453	18.1
	50	550	11.0
EI Paso 144	25	540	21.6
	50	870	17.4
Don Juan INTA	25	710	28.4
	50	779	15.6
IRGA 417	25	632	25.3
	50	946	18.9

(轉摘自 *Rios*)

對氮肥的推薦等級與時機多以一般栽培品種，同時在建立於不同土壤類別的田間試驗。氮肥施用的目的乃為增加稻穀產量，但過量的施用氮肥常引起稻株倒伏，而降低稻穀的收量。為減少倒伏，可於稻田形成固定浸水系統前(基肥施用期)，施用推薦總氮量的 50%，剩下的 50%可於季中進行追肥。對於倒伏敏感性較高的品種，可於稻田形成固定浸水系統前，施用推薦總氮量的三分之二量，剩下的三分之一的量，視當時環境條件而定，季中不一定要施用。許多的研究資訊顯示，施用鉀肥可減少倒伏，見 2.4.3.(5)。

2.4.1.(8)水播種水稻氮肥施用時機與方法

尿素為一般氮肥的選擇

假如在生長期土壤不允許乾時(因為常下雨)，水稻的大部分氮肥是在浸水和插秧前施用。氮肥常施於乾土隨後立刻淹水或者將肥料用淺耕入土壤於 3-5 天內淹水。如果過 3-5 天後再淹水，而以銨態氮肥施用在持續淹水中期間，大部分的氮將轉換成硝酸態氮。當土壤再浸水時，硝酸態氮可因脫氮作用而損失。

脫氮作用的損失可以於氮肥施用後 3-5 天內持續淹浸土壤而避免。這種損失最大量是發生在幼秧苗期施肥，水稻小吸收少因而損失。當大部分的氮於插秧前施入，則田不可排水，如於生長季中田必須排水，也不能完全排乾，必須維持在飽和狀態，以保護插秧前所施入的氮肥。

從節間的伸長到抽穗的開始，氮必須有效充分的供應以促進最大量穀粒數。這個時期的氮缺乏將減少潛力穀粒數而限制生產的潛能。

充足的氮施用於浸水或插秧前以確保水稻不須再添加氮直到穗始原體生成或幼穗分化至 2 mm 的階段，當需撒施追施氮肥，每當氮缺乏症狀出現時也是如此。

2.4.2.磷

2.4.2.(1) 磷的功能與需磷特徵

適當磷的供應對於水稻最高稻穀量的生產亦有關鍵性的角色。磷於水稻營養生長期為一重要的營養元素，它提供早期水稻的生長和強壯根系的發育。與相同時期之健康植株比，作物磷缺乏葉片變小呈暗綠色，分蘗減少，成熟延遲，葉柄可能產生花青素而呈紅色或紫色。一般每生產 500 公斤稻穀需從土壤中吸收磷（P_2O_5）4-7.5 公斤。水稻對磷的吸收與氮不同，一般在拔節前吸磷 50%，拔節到孕穗吸收 10%，孕穗到抽穗吸收 30%，抽穗後吸收 10%。

2.4.2.(2) 土壤酸鹼性對磷的有效性之效應

目前磷肥的推薦主要是基於土壤中有效性磷的含量與土壤酸鹼值與磷有效性的關係為基礎。磷的有效性最適宜是當土壤酸鹼值(pH)為 6.5 時。對於高地磷適宜有效性的土壤 pH 是 6.0-6.5 間。酸性土壤(pH< 6)由於土壤中的磷大部分與鐵與鋁結合，對大部分作物之磷肥效是小的。當形成浸水系統後，磷肥效則因還原環境而增加，因此，對連續浸水栽培的水稻其磷肥效較土壤常用檢測方法所測得的數值高。

當土壤 pH 大於 6.5 時，土壤磷主要與鈣與鎂元素複合，並不是所有鈣和鎂磷複合物的磷有效性低的而是因土壤 pH 的升高而使磷的有效性下降，因此，酸性土壤磷的有效性並非水稻栽培的限因，相對的，土壤 pH 較高(pH> 6.5)的鈣磷化合物的有效性低且於形成浸水系統後持續的低，影響水稻的生長。

在浸水的條件下：

- Fe^{3+}-P 複合物中磷被釋放，此時在一個低氧的環境條件下 Fe^{3+}-P 複合物還原而轉為 Fe^{2+}-P 複合物，磷的有效性較高。
- 高土壤 pH(＞7.0)，富含豐富的鈣形成 Ca-P 複合物可能無法釋出足夠的磷至土壤溶液中。

研究指出土壤 pH 比土壤檢測磷是個很好的預測水稻對磷肥反應的指標。然而，土壤 pH 並不是固定不動的，依照採樣的時間、環境條件和其他的因子常超過一個單位的變動。因檢測出低磷量而施磷肥於無擾動的酸性土壤中，也常造成產量無明顯增加，甚至會增加倒伏，造成的茂盛營養生長而或減少產量。

浸水的稻田土壤通常適度地將 pH 導向中性，以促進土壤磷的有效度。在一個案例中，土壤有效磷的含量是低於 8 mg/kg，但產量的反應卻與土壤有效性磷量無顯著相關。當土壤是浸水時，還原的條件使磷從三價鐵與鋁磷轉成移動性更高的型態，此種反應可滿足水稻磷的需求。

2.4.2.(3) 缺乏症狀

依照土壤檢測的結果或田間出現缺磷的症狀 (圖 11 和 12)為施磷肥的時機。外觀的磷缺乏症狀可能並不是構成產量降低的限制因子。在浸水前，進行整株植株的分析以確保是否有足夠的有效磷，植株磷的含量至少需高於 1.8 g/kg，才能確保產量。

磷的缺乏症狀通常出現在植株較低 (老葉)的部位，同時(1)葉片數減少，(2)葉片長度減少，(3)穗/植株降低，(4)每穗的粒數降低和(5)每穗的充實度降低。在一個磷肥力極低的土壤中水稻產量降低的重要因子。

圖 11、缺磷(左)與正常水稻(右)

圖 12、田間水稻缺磷，分蘗減少，葉狹短直立。(石灰質沖積土，彰化溪州，2012)

2.4.3.鉀

2.4.3.(1)鉀的功能

高產的水稻品種對鉀的吸收常較氮以外的其他養分高甚多。在 5 t/ha 的產量水準的總鉀吸收量約 100 kg/ha，其中超過 80%集中在成熟期的稻稈中(Dobermann and Fraihurst, 2000)。當產量高達 8 t/ha 時，其總吸鉀量甚至超過 200 kg/ha。農田對鉀平衡的較重要因子，包括土壤性質、氣候、品種和栽培的管理。

任何穀類作物的產量受單位面積穗數、一穗粒數、千粒重影響。光合作用和同化產物的轉運則影響這些因子。鉀對於改善粒數和粒重有特別有效。每公斤鉀的稻穀產量反應，乾季較濕季高。

2.4.3.(2)水稻對鉀營養的反應

適量的鉀可促進

- 分蘗。
- 穗的生育。
- 小穗花的發育。
- 氮與磷肥養分的吸收。
- 葉面積與延遲葉老化。
- 病害的抗性。
- 根的伸長與粗壯。
- 莖的厚長。
- 對病蟲害的忍耐性。
- 增加倒伏抗性。

2.4.3.(3) 鉀缺乏的出現

一般的水田條件下，推薦鉀肥的量是很少能充分平衡鉀被移除的比例，因此，大部分的集約式的水稻生產系統呈現反向的平衡和負效應的問題。當稻草從田裡全被移走時，此問題逐漸的嚴重。鉀缺乏的限制因子常出現於低地水稻生產的地區。

2.4.3.(4) 鉀需要量、施用時機與施用方法

鉀肥的田間試驗顯示欲增加 20%的產量，每公斤 K_2O 的施用平均產量的反應是 10.6 kg，一般稻田土壤對於缺鉀的臨界值是屬於較高的(土壤交換性鉀含量高於 250 mg/kg)。只有大約 10-20%被作物吸收的總鉀量轉運至稻穀部位，平均稻穀產量為 7,567

kg/ha，故在收穫後被帶走大約 22 kg K/ha，大約相當 K_2O 27 kg/ha，成熟的水稻包括地上部的乾物質重約在 6,800 至 9,000 kg/ha，平均包含 235 kg K/ha，也就是在這產量水準下作物總吸收 284 kg/ha 的 K_2O。

適量的鉀對於高產的水稻是不可或缺的，鉀在植物體內移動性快。研究顯示，於拔節伸長期(IE)後補充鉀也能持續的增加稻穀的產量，採集 IE 時期整個植株鉀的分析也比早期抽穗時劍葉的分析佳。

2.4.3.(5) 鉀可減少倒伏

一項密蘇里大學 Delta 研究中心所作的試驗顯示，水稻生長季中葉面噴施二次，每次 30 kg/ha 硝酸鉀可明顯減少倒伏 (圖 13)，但以氯化鉀於插秧前當基肥施用或季中當追肥施用則無法改變倒伏的等級。

2.4.3.(6) 鉀的缺乏症狀

鉀缺乏會導致水稻對病害的抗性降低，外觀葉片出現褐色斑點和莖腐壞，發生的徵狀從下位葉 (老葉) 開始，鉀的缺乏也使稻稈的厚度降低。

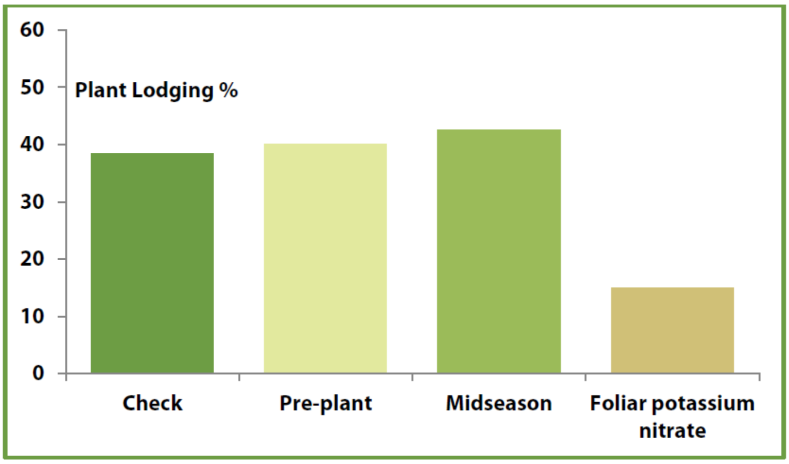


圖 13、對 Baldo 水稻葉面施肥噴施二次每次 30 kg/ha 硝酸鉀可減少倒伏

2.4.4. 氮磷鉀對水稻產量的效應

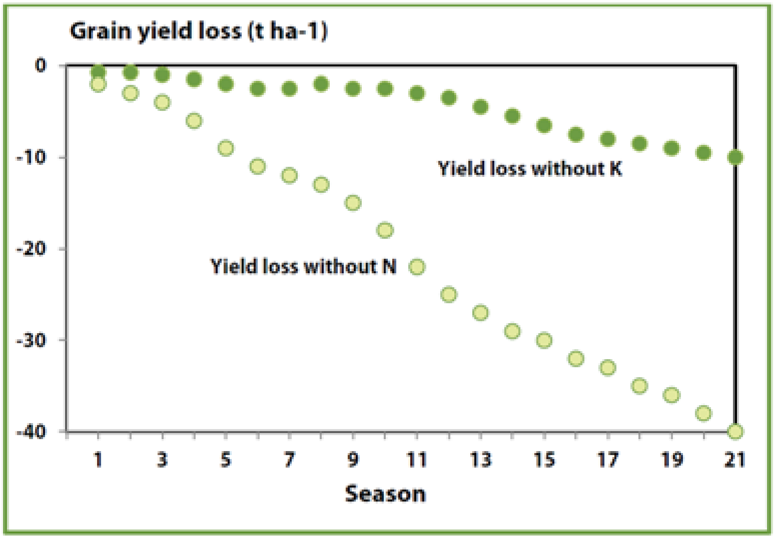


圖 14、連續種植 21 季水稻後，無氮區和無鉀區對於產量的損失(Long Term Fertility Experiment, SukamandiExperiment Station, Indonesia)

2.4.5.次量元素

2.4.4.(1) 硫

硫對水稻的生長在生化與生理作用上扮演著重要角色，主要是在蛋白質的合成和碳水化合物的代謝。硫的缺乏症狀與氮非常類似，植株生長緩慢成淡黃色，然而，主要不同在於硫在植株內移動較慢，黃化葉出現在上位葉較先於下位葉。

大部分的硫含在土壤有機質中，硫缺乏經常出現在土地經常更新利用方式的地區。一般只要在插秧前至二至三片葉期間，施用硫酸銨〔$(NH_4)_2SO_4$〕超過 112kg/ha 即可避免，這種處理可提供 23 kg/ha 的氮和 26 kg/ha 的硫。

2.4.4.(2) 鈣

鈣影響細胞膜的機能與細胞壁的強度。大部分作物的鈣利用是失序的，造成的原因是不適合的生長條件和沒有充分的鈣供應。由於在熱風的條件下作物生長快速，這種風險則提高。鈣的缺乏也可能由於吸收過量水、土壤鹽分過高、高鉀和銨的供應、和根發生病害。

鈣的移動是靠葉片的蒸散作用進行，蒸散作用速率低時缺乏症狀出現在幼葉和生長點，當嚴重的鈣缺乏時，**最嫩的幼葉才會出現以下的症狀**。

- 葉脈間綠色而幼葉前端展開而中後部折合，出葉角度增大的特殊形態。
- 葉尖變白或退綠且捲曲。
- 沿葉緣側面壞疽。
- 生長點發育遲緩或壞死。
- 嚴重時老葉也會變褐色或壞死。

<u>重點與容易發生條件</u>

- 相對不發達的灌溉系統。
- 一般在酸性土、強淋洗、低 CEC 的旱地和低地土壤，土壤母質為蛇紋石、粗質地砂質土滲漏性和淋洗高和已淋洗至低鹽基含量的硫酸化土。

2.4.5.微量元素

2.4.5.(1) 鋅

植物鋅的功能，包括維持生物膜結構和機能的完整性，促進蛋白質的合成。在所有的微量元素中，鋅是大多數酶與蛋白質所需要的，它的重要角色：

- 光合作用與醣生成。
- 蛋白質合成。
- 繁殖與發芽需要。
- 生長調節。
- 對於病害的抗性。

<u>鋅缺乏與鹽土傷害與磷缺乏的區別</u>

鋅缺乏、磷缺乏與鹽土的傷害的症狀是容易且經常被混淆。鋅缺乏症狀經常是由於淹水後發生，而鹽土傷害的問題則於淹水之前乾土的條件。兩者可發生在同一田區。磷缺乏類似於鋅缺乏也是典型的發生淹水後，然而，磷缺乏通常不發生葉直立的黃化情形。鋅缺乏在浸水系統建立後短時間內發生，經常在幾天內，而磷缺乏則於淹水後一或兩星期才顯現。

水稻特別容易受鋅缺乏的影響，乃因為其生長在浸水土壤中導致鋅的缺乏。浸水土壤能降低鋅的有效性而增加可溶性磷和重碳酸鹽的濃度，進而加重鋅缺乏。冷水灌溉經常嚴重缺乏鋅。

對該不該施鋅肥，外觀症狀判定、田間歷史和土壤 pH 和土壤鋅的測定是重要的方法。但植株組織分析是有效率的正確判定那個養分造成不健康水稻有效的方法。

鋅缺乏症狀

鋅缺乏症狀經常被發現在浸水後 72 小時內，也因用深浸水和冷水而加重其症狀。如果缺乏症狀變得嚴重時則會以排除浸水以搶救水稻。假如土壤 pH 非常高，缺乏症狀可能在一次的淹水或一場雨後就出現。環境因子，例如冷溫，也可能增加缺乏症狀嚴重性。過多磷肥的施用也可能加重鋅的缺乏。症狀經常因之前的浸水，而不容易判定，增加從外觀判定的困難度。水稻秧苗從發芽起大約 10 天可由稻種取得充足的養分，因此，鋅缺乏症狀不會在秧苗發生，但它可能發生在發芽後數星期。不管是之前浸水造成不好判定或是嚴重的症狀觀察，包括：

1. 葉脈間的黃化，葉片接近莖的部位變成淡綠，而只剩葉尖還是暗綠，經常從最幼葉開始。
2. 浸水後二至四天葉片一半基部顏色呈淡綠。
3. 浸水後三至七天葉片變黃且開始死亡。
4. 葉片不正常狹長且發育遲緩。
5. 假如水稻已浸水或灌水中，葉片變薄易於浮在水表面。灌水中的秧苗會加重鋅的缺乏，造成外觀症狀更顯著，有可能成為浸水前根據外觀診斷指標而誤判，所以灌水時多關注於較幼嫩的植株。
6. 古銅色化，褐色至紅色的汙點出現於最老葉片，古銅色的葉片組織可能最後轉變為褐色。植株的古銅色表現即當仔細的診察經常會發現此葉片有不規則生鏽的形狀的出現。
7. 葉鞘或接合點成堆疊。
8. 發育遲緩或減低株高。

土壤類型對於鋅缺乏效應

鋅缺乏廣布於低地水稻和高土壤 pH 的微量要素的營養失調現象，經常需添加鋅以改善水稻的生產。

鋅缺乏一般發生在坋質和砂質壞土或梯田。主要在於土壤鋅有效性低，或含碳酸鈣灌溉水或是過多的石灰。對改善方法為降低土壤 pH 或添加適量鋅。自從發現世界上許多水稻生產區在高土壤 pH(>7.5)的黏質土也出現鋅缺乏症狀後，農田高土壤 pH(>7.5)的黏質土必須小心的監測。

鋅施用的時機與方法

濕田種植水稻，用施鋅於土壤中的方法，必須於浸水之前施用硫酸鋅。

假如插秧前土壤檢測出缺鋅，則撒施 8-11kg/ha 的鋅，即 22-34 kg/ha 的硫酸鋅。可於插秧前施用或浸水後馬上施用，此時水稻根的發育接近於土壤表面，鋅的大部分必須在或接近土壤表面。在旱田種植水稻系統中，土壤施用鋅必須撒施和淺耕入不超過 2.5-5 cm 深的土壤中，在旱田種植水稻系統剛開始的根發育是向土壤表面之下，因此，撒施鋅淺耕入土壤中是非常有效，沒有耕入土壤的鋅則位於根域之上。

假如缺乏症狀發生在水稻發芽之後則施用蟹合鋅 0.5-1 kg/ha，且以葉面施用，蟹合鋅亦可與防治稗的藥劑混合同時噴施。

在中性與微鹼性的沖積土，施用鋅於土壤中是無效的，而以葉面施用或葉面

加土壤施用較以單獨以土壤施用效果好。若已發現鋅缺乏則儘快以葉面噴施。

2.4.5.(2) 硼

硼對水稻(和其他作物)的主要功能

- 對細胞壁生物合成有重要的部分作用。
- 影響細胞構造與原生質膜的完整性。

水稻硼缺乏症狀

- 幼葉出現白色和捲曲的葉尖。
- 植株高度降低。
- 新生葉尖是白色和捲曲(和鈣缺乏相似)。
- 生長點壞死，但在嚴重地缺乏期間新蘗繼續分生。
- 在穗形成階段時，由於缺硼的作用下，作物不能生成穗。

硼缺乏校準方法

對於一些土壤種植前適當硼含量為 0.25-0.5 kg/ha，以熱水抽出法檢測土壤硼符合的臨界值是 0.25-0.35 mg/kg。為達這含量等級建議撒施 0.75 kg/ha 硼，也可以商品硼肥($Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$,含 11%純硼)施用 6.8 kg/ha，或是硼酸(H_3BO_3, 含 17.5%純硼)施用 4.3 kg/ha。

2.4.5.(3) 鐵

鐵缺乏症狀

鐵缺乏症狀是新生葉黃化或葉脈間失綠，進而整個葉片轉為黃色，最終轉為白色。假如嚴重缺乏則整個植株變為萎黃和死亡。鐵的缺乏容易與氮的缺乏混淆，區別在於氮缺乏首先出現於老葉，而鐵缺乏首先出現於新生葉。

容易產生水稻鐵缺乏的土壤條件

水稻對鐵的需求高於其他作物，鐵缺乏一般是水稻種植於排水良好的土壤中，不管這些土壤是中性、石灰性或是鹼性。假如是浸水的水田，鐵缺乏容易被發現在石灰性與鹼性、有機質含量低和以鹼性水灌溉的土壤。

檢測土壤診斷

排水良好且 pH>6.5 之土壤容易發現有效鐵的缺乏，問題的嚴重性隨 pH 的增加而增加。

已浸水土壤(排水不良)，假如在土壤 pH 7 而氧化還原電位高於 0.2 volt，在這情形下，土壤總鐵含量可能是高的，但有效鐵含量是低的。

鐵缺乏常以**檢測土壤鐵濃度**作為診斷指標

- 以 pH=4.8 醋酸銨溶液萃取的鐵濃度低於 2 mg/kg。
- 以 pH=7.3 DTPA- calcium chloride 溶液萃取的鐵濃度低於 4-5 mg/kg。
- 以植體分析診斷：採集分蘗期至幼穗分化期莖的樣本分析，缺乏臨界值為 50 mg/kg。

與其他元素間的交互作用

土壤中或灌溉水中高濃度的碳酸鈣容易加重水稻鐵缺乏。高磷酸鹽的施用也可能造成鐵的缺乏，或因鐵在土壤溶液中變成磷酸鐵沉澱而使缺乏更嚴重，高的磷酸鹽含量也會妨礙鐵被作物吸收和鐵從根系轉運至地上部。

如何改善水稻鐵缺乏

鐵缺乏可以 20-30 mg/L 的硫酸鐵($FeSO_4$)溶液葉面噴施改善。另外方法則以 30 kg/ha 的硫酸鐵施用於土壤，因為鐵在植物體中是低移動性，追施肥可能是必

需。

2.4.5.(4) 錳毒害

資料來源:Corinta Quijano-Guerta, International Rice Institute, Philippines

錳毒害症狀

水稻錳毒害的外觀症狀是老葉呈現褐色斑點，大約插秧後八星期葉尖乾枯。營養生長不會察覺受影響，但稻穀產量明顯減低因為不授粉率高。

錳毒害的土壤條件

錳毒害有時發生在土壤 pH<5.5 的旱地水稻。

低地水田土壤很少發生，但如果土壤含大量可還原性錳，或是地區性錳礦開採的汙染則另當別論。

檢測土壤診斷

錳毒害可能是相對高的可還原性錳存在土壤中，但並未建立臨界值。水抽出土壤溶液中錳水準若超過 2 mg/L，應考慮是否是錳毒害發生。

分析植體診斷

臨界限制因子

植體檢查的器官	生理階段	值(mg/kg DW)
地上部	分蘗期	7,000
葉	開花期	3,000

與其他元素的交互作用

在有氧土(aerobic soil)而 pH 降至 4.5 以下，可溶性錳的急遽增加，相對地，當土壤 pH 降至 2.7-3.0 時，鐵才變為可溶性鐵。這種 pH 的下降增加 Mn/Fe 比，而導致錳毒害。

有研究指出，矽可減少水稻對錳吸收而減輕錳毒害，同時也增加作物組織內部的耐受性。錳毒害常伴隨著鋁毒害與磷缺乏。

如何改善水稻錳毒害

施用石灰常是補救錳毒害的方法，施用硫酸亞鐵、石膏和農家廄肥也有幫助，也能施用 1.5-3.0 mt/ha 的矽酸爐渣。

2.4.5.(5) 鋁毒害

資料來源:Corinta Quijano-Guerta, International Rice Institute, Philippines

鋁毒害症狀

受鋁毒害的水稻症狀顯示在老葉葉尖的葉脈間呈現白至黃色，稍後則為壞死，根的生長受阻且變形。

容易產生鋁毒害的土壤條件

一般作物鋁毒害產生於極育土(Ultisols)和氧化土(Oxisols)和一些強淋洗的土壤，例如一些在濕潤亞熱帶區的紅壤化的土壤，旱地且 pH<5 的土壤是水稻生長的重要限制因子。

鋁毒害大部分發生在硫酸化土浸水初期的低地水稻田土壤。硫酸化土經浸水後土壤 pH 的提升是非常慢，因此，其毒害可持續數星期。

檢測土壤診斷

土壤 pH<4，土壤溶液中鋁濃度超過 1mg/L，為鋁毒害的臨界值指標。

分析植體診斷

分蘖期地上部(shoot)的鋁濃度超過 300 mg/kg 一般被認為可發生鋁毒害。

與其他元素的交互作用

旱地水稻鋁毒害總是伴隨錳毒害和磷缺乏發生。鋁毒害阻礙水稻對磷、鈣、鉀的吸收。

如何改善水稻鋁毒害

石灰質化將可增加土壤 pH。有可能可施用白雲石灰(碳酸鈣鎂)以提高土壤 pH，但必須施用磷鉀肥。

其他的栽培措施

推薦提早的耕犁，浸水時間則可往後在於雨季結束後較適當。硫酸化土需要一個淺的排水系統。

農民需於延長土壤浸水時間後插秧，及選擇對於鋁毒害耐受性高的品種種植。

3. 施肥推薦方案的制定與實施

3.1 肥培管理與施肥效果

3.1.1 施肥原則概述

施肥的目的為供給作物所需的各種養分於作物需要的時期，且施用的肥料不致使土壤劣化並有效的提高收穫物之生產。當施用肥料於作物時，必須具備有關(1)施用時期，(2)肥料種類及(3)施用方法等方面之知識。

作物的生育，為自種子發芽後乃進入營養生長期，又經莖葉繁茂的生育最盛期轉變為生殖生長期，並經由開花，成熟等時期而再生成種子，如此反覆進行乃形成作物特有之循環。接近幼苗移植期時，應使其生育暫時停止，葉色變淡，且促使地上部發育不如充實根部。當秧苗移植時，其苗根幾乎會枯死，依其在本田中發育的新根而進行吸收養分，雖然成活後會迅速開始吸收養分，因為初期的個體重量小，其絕對量則少。水稻自移植至本田後至成活期止的養分吸收緩慢，待成活期後則迅速吸收，且一直至出穗期前，皆在逐漸增加其養分吸收量，但待抽穗後則會慢慢地減少其吸收量。已有為數眾多的關於作物與施肥時期方面之試驗成果，若綜合該等試驗報告，則氮肥應以作為基肥為原則，若作為追肥而分施時亦可見效果，且若分施次數增多，其收量則可能增加。

磷肥料係應作基肥而施用者，但亦有一部分被作為追肥而施用者。鉀與磷同樣，雖然應作基肥而施用，但在某些特別情況下，如鉀容易流失之土壤，鉀可作追肥而分施之。

水稻係以生產稻米為目的而栽培之作物，其施肥時期，尤其是氮被吸收的時期，對水稻的生產量有極大的影響。

3.1.2 基肥的施用

將分配為基肥的氮肥量於水稻淹水前，乾土時撒施於稻田中，並立刻予以淹灌。此為細耕犁後，整平前的最佳基肥施用時機。氮肥藉由整平充分併入土壤，並立刻淹水，淹水的目的主要是保護施入的氮肥因脫氮作用損失，提高氮肥利用效率。

3.1.3 為何水稻需要浸水栽培？

傳統的水稻栽培為當育秧或插秧時進行秧苗田或本田浸水，其管理措施需要築堤及渠道的作業，但相對的可減少雜草與蟲媒植物的生長，及小型囓齒動物及病蟲的危害。適當的灌水深度可使水稻植株有能力提高與雜草對養分與日光的競爭而減少殺草劑的使用。依生長時期的不同，水稻通常長在田面水深 5-25cm 的土壤環境中。但當水稻的生長與栽培時灌溉浸水不充分時，其灌溉的方法必須更加致力在生長期間之雜草和病蟲的防治及土壤供肥的管道。

3.1.4 分肥或一次施用？

分肥或一次施用孰較好，並無定論，因為影響氮肥供應的因子很多，其中環境條件的不同，直接影響氮肥的供應速度。水稻插秧在過乾的本田會延遲永久浸水系統的建立直到株高 15 至 20 公分高時，理想的追施氮肥量應於預先浸水至永久浸水系統建立的期間，至少施以總施氮量的 50%，剩餘的氮量也應於節間 1.2 cm 後 10 天施用完成。各地區的用量需要有詳細的田間試驗測試，初步的結論為相同的氮肥若表施時，分施較一次施用的產量效果為佳。

氮追肥係為針對當時而補充施用者，不過，施用追肥時，若不能仔細觀察作物之營養狀態而適時施用，則有時會因此而招致倒伏或稔實不良。

3.1.5 何時水稻的生育期為施氮的需求

氮不像磷鉀鋅營養要素，可利用土壤檢測方法，測定土壤對這些養分的供應力，以補施肥料來滿足水稻對於這些營養要素的需求。水稻於分蘗期需要氮以確保穗數的足夠。所以，一般農民會於約插秧後 14 天的分蘗盛期時施氮肥(蘗肥)和幼穗分化期施氮肥(穗肥)，以降低穗數不足的風險。

幼穗分化期時一般會供應氮和鉀肥以符合水稻所需，此時氮不足將會減少一穗粒數致使稻穀產量的降低，而鉀不足將會減少一穗粒數與穀粒的充實而降低產量。

3.1.6 氮肥培的產量反應

氮對水稻產量反應是非常敏感，氮肥的施用對產量的增加明顯高於不施氮肥者。氮肥施用如果越接近水稻淹水插秧時，其產量常高於施用前後才浸水的效應。如果施肥後能於短時間淹灌，能減少因脫氮和淋洗作用造成氮的損失，稻穀產量也損失較少。

水稻過量施用氮肥而使稻株倒伏，尤其於生長中後期，遇較大風吹時間易造成收穫時產量的減少，尤其易遭受颱風侵襲的地區種植對倒伏較敏感的品種(圖 13)，同時也容易遭受病蟲害(圖 14)，所以各地區適當施用氮肥才是合理的氮肥培管理。

圖 13、一期作水稻倒伏情形圖
(屏東，102 年)

14、過多的氮肥施用易遭受病蟲害危害
(屏東，102 年)

3.1.7 葉面施肥

(見 6. 區域施肥推薦技術)

3.1.8 深層施肥

(見 6. 區域施肥推薦技術)

3.2 三要素推薦施肥方法

3.2.1 目標產量選定與氮肥施用量

肥料的推薦策略對氮而言，應當足夠敏感，同時可提高磷鉀的活性。水稻氮之必需量，因品種、土壤、氣候與栽培管理方法等而有差別。為制訂我國水稻區域之目標產量與分別的氮肥推薦量，民國 100-104 年於本省不同氣候生態區與土壤管理組類別進行「**不同水稻品種氮肥等級試驗**」，茲將部分成果作檢討，期能決定各地區水稻氮肥施用大致用量，而推薦給農民使用。

民國 100-102 年六期作栽培期間氣象條件顯然不同，試區土壤管理組也不同。故不考慮氮肥量外之限制因子時，台灣西部依地理位置與縣市大致可劃分桃園地區、竹苗地區、中彰投地區、雲嘉南地區、高屏地區與恆春半島等六個施氮肥生態區。

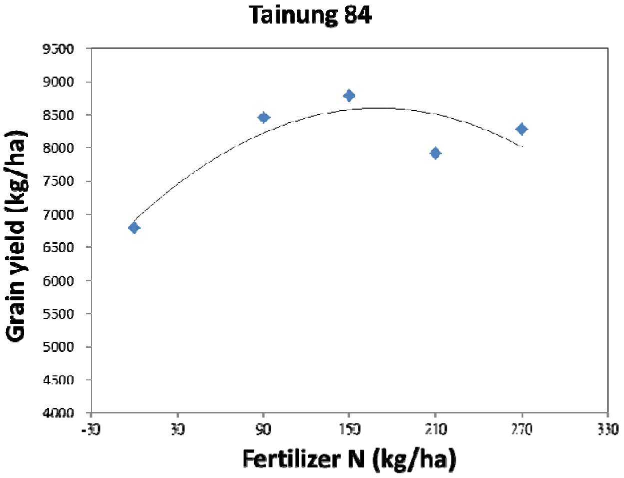
考慮氮肥量對水稻產量之效應，依民國 100-102 年桃園地區六期次不同品種與 0、90、150、210、270 kg/ha 施氮量之水稻氮肥(尿素)試驗，施氮處理分別於水稻移植前全層施用基肥、分蘗始期(一期作移植後 15 天和二期作移植後 10 天)、最高分蘗期(一期作移植後 30 天和二期作移植後 20 天)、幼穗分化期(一期作移植後 56- 70 天和二期作移植後 45-53 天)則以最少田面水狀況下撒施，每公頃重分別為總氮量之 40、20、15、25%施用。試驗施肥時期與要點，如表 8，需視當年度氣候與生長外觀形態稍加調整追肥。

以民國 103 年一期作六個試區 20 品種五個氮肥等級的田間試驗的結果，施氮量與稻穀產量的關係共可分為三個趨勢圖 (圖 15)。

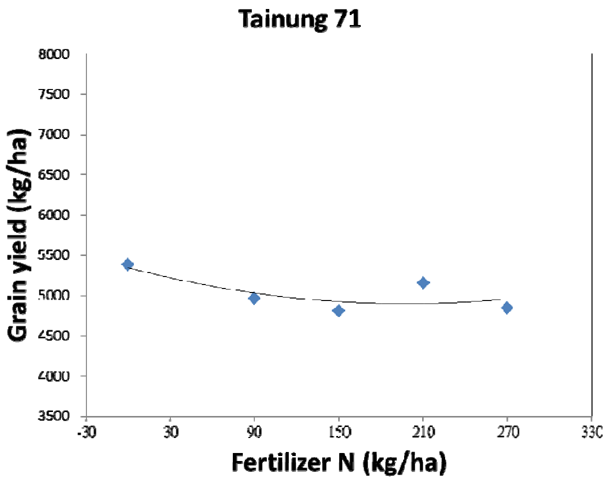
以台南 11 號水稻品種稻穀收量與施氮量進行曲線模型進行模擬所得迴歸線，如表 1，最大可達到目標產量的訂定，是以迴歸線 98%的產量水準，另參考三年度不同期作出現產量的頻率為基準，計算出作物歉收的風險最低的情形下可實現高產和高收益的氮肥施用量推薦。其中部分生態區的期作，當試驗用最高施氮量 270 kg N/ha，並未見收量減少的趨勢，如竹苗地區二期作，其收量是否為除氮量外的重要因素所決定，此必須關聯更多的田間試驗資料以釐清。

表 8、試驗施肥時期與要點

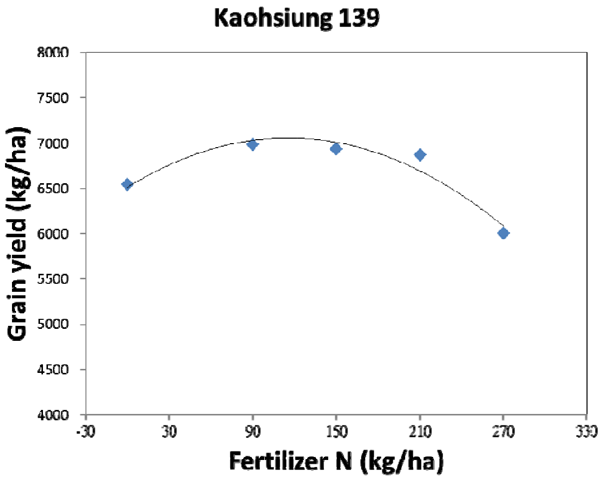
生育期	施肥時期原則 (需視當年度氣候與生長外觀形態稍加調整)		要點
插秧前	施　用　基　肥		於第二次碎土前把肥料均勻撒施，混入 0-12 公分土層中，3-5 天內灌水整平。
分蘗初期	插秧後	一期 15 天 二期 10 天	施第一次追肥。
分蘗盛期	插秧後	一期 30 天 二期 20 天	施第二次追肥
有效分蘗終止期	插秧後	一期 35-40 天 二期 25-30 天	分蘗數已足，開始間歇灌水，停止施肥。
曬田始期	插秧後	一期 58-63 天 二期 48-53 天	1.實施曬田，曬至土面發生小龜裂為止。需要時再灌水 2-3 天再排水曬田。 2.視氣候及稻株發育情形，於曬完田後灌水經 3-5 天後，水稻進入幼穗形成期。
幼穗形成期	到田間檢查母莖，幼穗長達 0.2 公分前後二天內，施用穗肥。		



類型 I



類型 II



類型 III

類型 I 具氮肥肥效型
類型 II 不具氮肥肥效型
類型 III 土壤氮供應型

圖 15、不同施氮等級與稻穀產量主要類型(民國 103 年一期作新屋試區 20 品種)

桃園地區

表 9、桃園地區台南 11 號水稻品種不同施氮量等級與稻穀收量迴歸所得推薦氮量

地區	期別	品種	方程式	目標產量 (kg/ha)	生產管理目標施氮量 (kg/ha)	經濟管理目標施氮量 (kg/ha)
桃園地區	一期作	臺南11號	Y= -0.0552X2+19.096X+5065.4 r^2=0.9663**	6700	155	90
	二期作		Y= -0.0331X2+12.456X+4061.4 r^2=0.9846**	5200	155	90

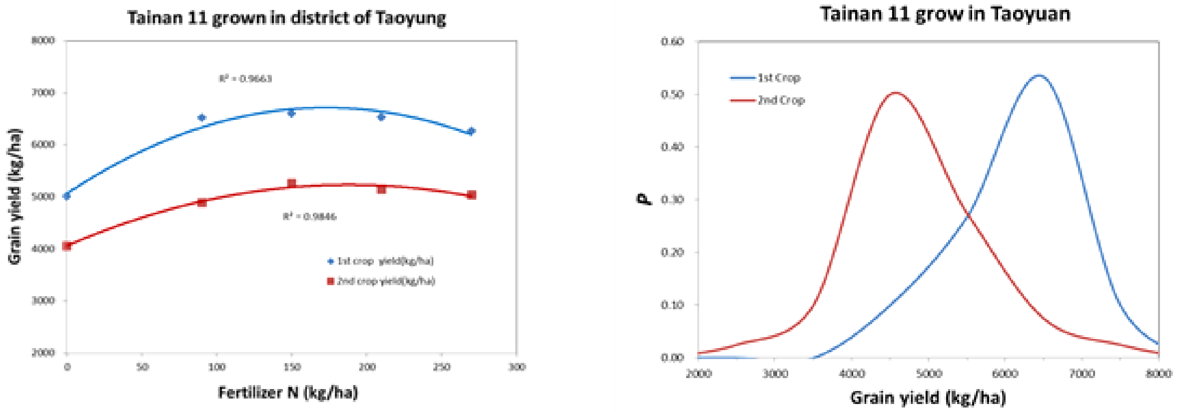


圖 16、民國 100-102 年桃園地區台南 11 號不同施氮量之產量效應與出現頻率

竹苗地區

表 10、竹苗地區台南 11 號水稻品種不同氮量等級與稻穀收量之迴歸所得推薦氮量

地區	期別	品種	方程式	目標產量 (kg/ha)	生產管理目標施氮量 (kg/ha)	經濟管理目標施氮量 (kg/ha)
竹苗地區	一期作	臺南11號	y= -0.0677x2+26.196x+4907.2 r^2=0.9867**	7300	140	100
	二期作		y= -0.0101x2+10.904x+3500.3 r^2=0.9405**	5200	160	110

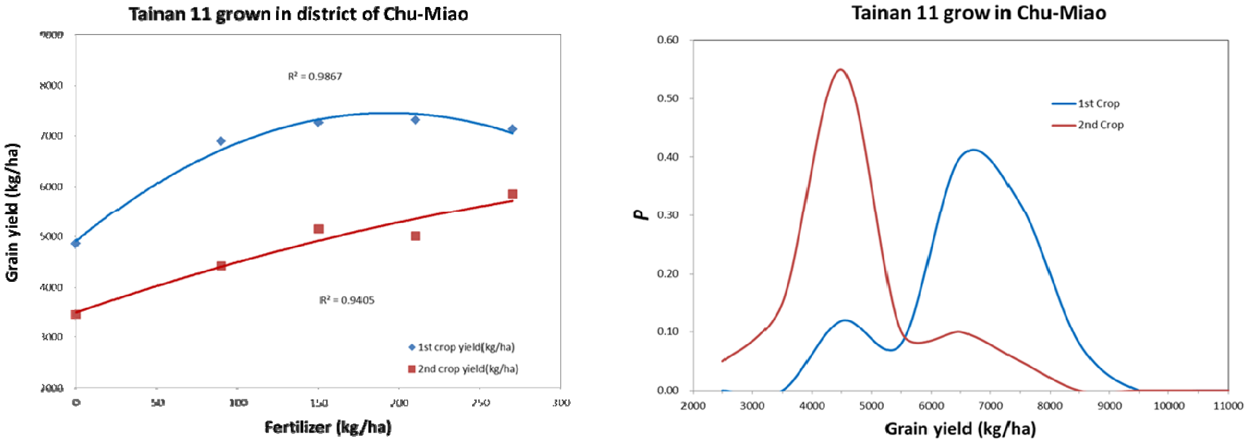


圖 17、民國 100-102 年竹苗地區台南 11 號不同施氮量之產量效應與出現頻率

中彰投地區

表 11、中彰投地區台南 11 號水稻品種不同氮量等級與稻穀收量迴歸所得推薦氮量

地區	期別	品種	方程式	目標產量 (kg/ha)	生產管理目標施氮量 (kg/ha)	經濟管理目標施氮量 (kg/ha)
中彰投地區	一期作	臺南11號	y= -0.0357x2+15.913x+5461 r^2=0.9513**	7200	190	140
	二期作		y= -0.0153x2+7.6288x+5132.4 r^2=0.9971**	6000	175	130

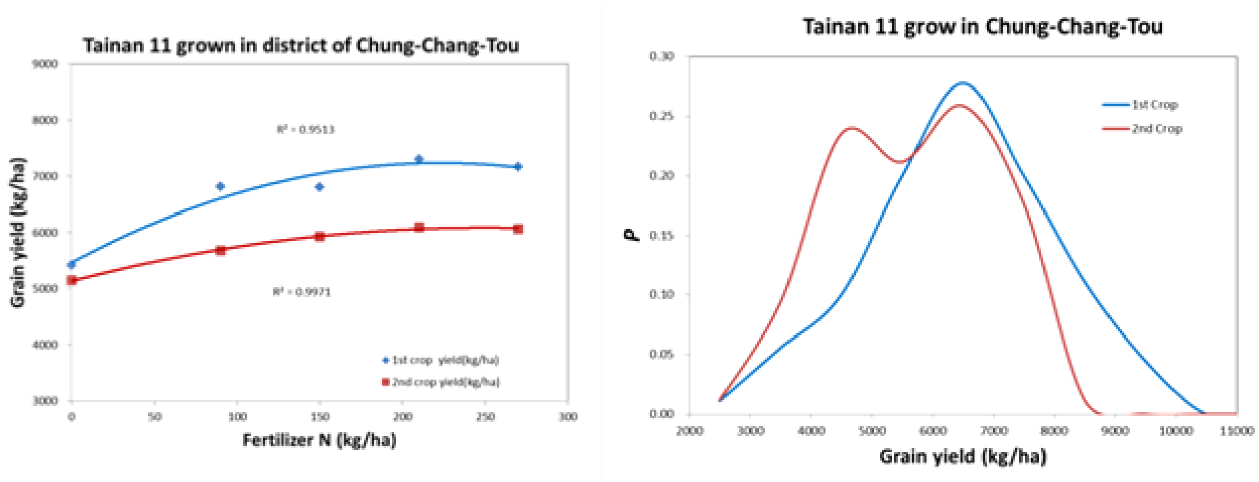
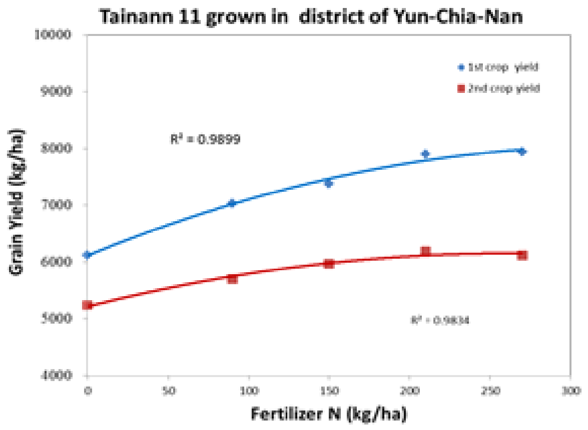


圖 18、民國 100-102 年中彰投地區台南 11 號不同施氮量之產量效應與出現頻率

雲嘉南地區

表 12、雲嘉南地區台南 11 號水稻品種不同氮量等級與稻穀收量迴歸所得推薦氮量

地區	期別	品種	方程式	目標產量 (kg/ha)	生產管理目標施氮量 (kg/ha)	經濟管理目標施氮量 (kg/ha)
雲嘉南地區	一期作	臺南11號	y= -0.0175x2+11.618x+6117.3 r^2 = 0.9899**	7800	210	165
	二期作		y= -0.0134x2+7.0805x+5222.1 r^2=0.9834**	6000	150	110



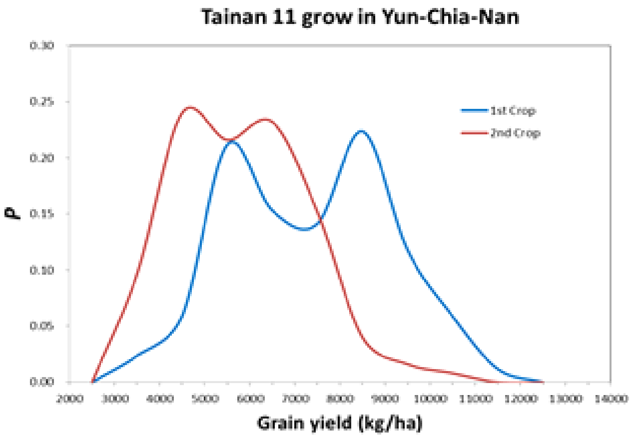
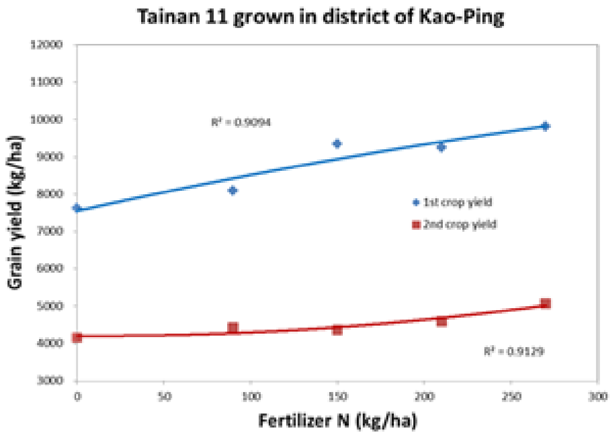


圖 19、民國 100-102 年雲嘉南地區台南 11 號不同施氮量之產量效應與出現頻率

高屏北地區

表 13、高屏北地區台南 11 號水稻品種不同氮量等級與稻穀收量迴歸所得推薦氮量

地區	期別	品種	方程式	目標產量 (kg/ha)	生產管理目標施氮量 (kg/ha)	經濟管理目標施氮量 (kg/ha)
高屏地區	一期作	臺南11號	y= -0.0072x2+10.319x+7554 r^2 = 0.9094**	9000	160	80
	二期作		y= 0.0122x2-0.2752x+4200.8 r^2=0.9129**	4500#	130	100



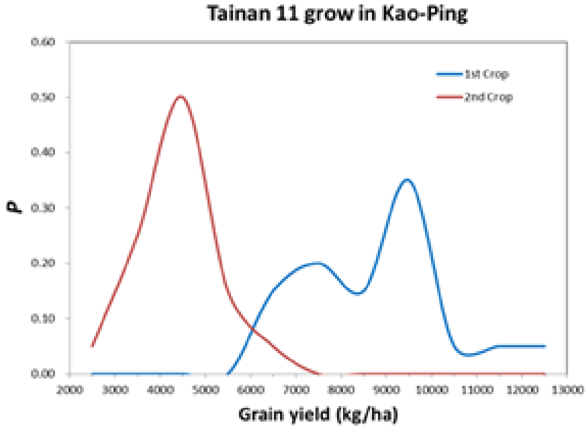


圖 20、民國 100-102 年高屏北地區台南 11 號不同施氮量之產量效應與出現頻率

西部地區水稻氣候生態區，台南 11 號水稻品種為達目標產量所建議的施氮量，如表 14。

恆春半島

表 14、西部地區台南 11 號水稻氮推薦量與目標產量

地區	期作	目標產量 (kg/ha)	生產管理目標施氮量 (kg/ha)	經濟管理目標施氮量 (kg/ha)
桃園地區	I	6700	155	90
	II	5200	155	90
竹苗地區	I	7300	140	100
	II	5200	160	110
中彰投地區	I	7200	190	140
	II	6000	175	130
雲嘉南地區	I	7900	210	165
	II	6000	150	110
高屏北地區	I	9000	160	130
	II#	4500	130	100
恆春半島	I	7500	160	80
	II#	--	--	--

#：試驗受病蟲害干擾

3.2.2 磷肥施用量(見 4.)

3.2.3 鉀肥施用量(見 4.)

4. 肥培決定參數

4.1 植體中養分的移除

水稻養分的補償施用量，常決定於每期作收穫時各部位吸收後從田間的移除量，水稻中營養要素在不同部位的移動是具獨特性，其中稻草與稻穀為主要的植物養分庫。而施肥中養分的最佳 N：P：K 比例因不同田塊而異，取決於欲達到的產量目標和每一種土壤養分的供應量。如果作物生長僅受養分供應所限制，最佳的營養平衡應該是每形成一頓稻穀產量水稻需要吸收 15 kg 氮、2.6 kg 磷和 15 kg 鉀。

當每年稻穀產量為 5,000 kg/ha 時，一般從土壤中移除的各養分量，如表 14 所示，若稻草和稻穀一併移走時，則矽和鉀的減少量會相當高，但若稻草留在田間和犁入土壤時，兩者的移除量則會大量減少。此結果與我國一年兩作水稻的栽種所得的結果相似。雖然施用氮磷肥，但每季結束後氮磷的持續移除的量仍然顯著 (表 15)。

4.2 植體分析資料

精確瞭解在生長階段之營養元素的臨界值是相當重要的，水稻中不同養分臨界值 (表 15 和表 16)，作為植體養分診斷的參考。

表 15、一般高產品種從土壤中移除各營養元素量

	Grain yield	N	P_2O_5	K_2O	MgO	CaO	S	Fe	Mn	Zn	Cu	B	Si	Cl
					kg/ha						g/ha		kg/ha	
FAO	5000	110	34	156	23	20	5	2	2	200	150	150	250	25

(資料來源 FAO)

表 16、民國 101-103 年三年台南 11 號水稻品種栽種吸收/移除的營養元素量(江，105 年)

	Plant part	N	P_2O_5	K_2O	CaO	MgO	Fe	Mn	Cu	Zn
				kg/ha				g/ha		
1st Crop	Straw	38	15	117	32	18	1187	2680	26	217
	Grain	62	36	23	3	11	249	304	26	137
	Total	100	51	140	36	29	1436	2984	52	354
2nd Crop	Straw	43	13	111	34	25	1686	2780	29	228
	Grain	56	29	20	5	10	304	296	23	126
	Total	99	42	131	39	35	1990	3076	52	354

資料來源：民國 101-103 年不同氣候區台南 11 號品種田間試驗，當一期作稻穀產量 7.1 t/ha，稻草產量 5.3 t/ha 二期作稻穀產量 5.2 t/ha，稻草產量 5.2 t/ha 的營養元素吸收量(江，105 年)

表 17、大量與次量養分濃度含量之臨界值

植株分析的部位	生長期	N	P	K	Mg	Ca	Si
		佔乾物質之%					
葉片	分蘖期	2.5	0.1				
稻稈	成熟期			1.0	0.1	0.15	5

表 18、微量元素缺乏(D)及毒害(T)之濃度含量臨界值

植株分析的部位	生長期	Fe	Zn	Mn	B	Cu	Al
		佔乾物質之 mg/kg					
葉片	分蘖期	300(T)					
莖	分蘖期		10(D)	20(D) 2,500(T)			300(T)
稻稈	成熟期		1,500(T)		3.4(D) 100(T)	6(D) 30(T)	

4.3 土壤檢測與臨界養分濃度

4.3.1 土壤採樣與檢測

1. 土壤的採樣

   田區和田區之間是有先天性的不同特性，因此，正確的土壤採樣方法是要能使檢驗的結果作為這塊田石灰或其他養分推薦的依據。
2. 土壤的化學性分析是在分析實驗室進行。
3. 土壤檢測資料是用於解釋和推薦系統的發展。

4.3.2 土壤檢測技術與氮磷鉀施用等級

在土壤檢測分析的技術中，土壤酸鹼值是最簡單但它對於養分缺乏與毒害問題卻影響甚大。

- 有效氮的測定是用浸水孵育法和鹼性高錳酸鹽萃取
- 有效磷的測定方法
  - Bray 1 和 Mehlich-3 磷的萃取

對於不同田間土壤，其檢測結果不同，主要是萃取液的不同。利用 Bray 1 和 Mehlich-3 萃取液萃取土壤中，檢測的結果不同。粗略的換算，Mehlich-3 萃取的值乘 0.75 則為 Bray 1 的測值。

- 有效性鉀則以交換性鉀測定的值？(編者註: 具編者的研究試驗，在台灣以 Mehlich-3 萃取的鉀較交換性鉀更能代表有效性鉀)。
- 有效性硫則用 $Ca(H_2PO_4)_2 \cdot H_2O$ 萃取。
- 有效性鋅則用緩衝鉗合劑或弱酸萃取。
- 有效性矽則用醋酸鈉萃取。

4.3.3 土壤磷水準的決定

精確的利用土壤磷量預測水稻生產中磷肥的需要量是困難的。試驗結果顯示，在許多浸水的水田土壤中施用磷肥對於水稻產量並無增加的趨勢，儘管以普通土壤

檢測方法(醋酸銨-EDTA、Olsen 和 Bray P1 方法)測出土壤萃取性磷低的情況下，也無明顯的磷肥效果。一般的土壤檢測方法並無法正確的評估水田土壤磷的供應力。浸水土壤中磷有效性的增加主要於可溶性三價鐵氧化物的還原而釋放固定性與吸附性磷，及土壤 pH 的改變影響可溶性磷化合物和磷從表面的脫附。然而，有機磷礦化的效應和可溶性氧化錳的還原，對磷源的釋放在浸水期間被認為是低的或可忽視。

水稻磷的缺乏廣泛發生在磷固定力高的土壤，主要發生在弱結晶性氧化鐵。浸水土壤有效性磷的供應主要歸因於大量還原存在結晶性差的氧化鐵的可溶性土壤磷。最有可能正確預測的磷肥反應，還是在還原態的環境下用萃取劑萃取土壤磷，或草酸萃取磷(弱結晶性氧化鐵結合的磷量)。浸水土壤中增加氧化錳的溶解度和釋放出與錳結合的磷也可增加磷的有效性。

磷容易被土壤礦物鍵結形成不溶性的複合物。其有效性很大部分受土壤 pH 控制。當 pH< 5.0，磷常與鐵和鋁礦物結合，pH> 7.4 則容易與鈣結合，無論是鐵磷、鋁磷或鈣磷對作物而言是無效性。一般土壤中總磷量的 10%對作物是有效的，其他 90%的有機磷不是立即有效，但經過微生物的降解一部分可成為有效性磷。土壤的檢測只檢測作物有效性磷，但對磷肥的推薦量必須考慮其他的 90%。

4.3.4 不同土壤酸鹼度之磷的有效性

高地的條件下，土壤有效性磷受數個因子影響，至少包括土壤 pH。有效性磷高的適合的土壤 pH 範圍為 6.0-6.5。

酸性的條件下，磷為鐵和鋁優勢吸附，形成鐵磷與鋁磷。隨 pH 的增加，磷為鐵和鋁氧化物吸附的量減少，更多的磷慢慢為鈣和鎂吸附，轉而以鈣磷與鎂磷為優勢。

當固定性浸水系統建立時，由於氧化還原反應使三價鐵(Fe^{3+})還原成二價鐵(Fe^{2+})，此時，鐵氧化物溶解性增加，導致磷的有效性增加。

鹼性土壤中，以磷酸鈣和磷酸鎂的型態佔優勢。因為鈣和鎂不受永久浸水系統建立時氧化與還原反應影響，溶解度和隨之而來的有效性磷也不會增加，因此，之前浸水時有效性磷的限因在浸水系統建立後將持續的為限制因子。

4.3.5 磷的推薦等級

土壤檢測的重點在推薦磷肥的是當施用量。研究資料顯示，以 Bray-1 方法檢測出土壤磷含量超過 35 kg Bray-1 P/ha 時，再施用磷肥時將無法增加水稻產量，而每 45 kg 稻穀因收穫將移走 0.35kg 磷。因這些均須備足的量，所以土壤檢測推薦經常包括為預期目標產量所增加的量。

4.4 葉片鉀與土壤分析

對每一鉀肥培施用量，可發現劍葉較下位葉組織含較高鉀含量。但若在 10%抽穗時較在拔節期，下位葉的鉀濃度是較劍葉的鉀濃度對產量有較佳的相關性。

一般推薦鉀肥量時，土壤檢測鉀量是低於 200 kg K/ha，如表 19 所示。

鉀肥推薦系統如基於土壤檢測的鉀濃度，當檢測值是低時，應有助於建立土壤鉀臨界水準，因稻穀吸收而被移走的鉀量是低的。同時也需知道，任何作物收穫後立即未被稻穀吸收移走的鉀仍可能在稻草中，因此，隨著時間的推移，鉀隨著稻草併入土壤中，土壤檢測得鉀量應該增加。

表 19、以 Mehlich 3 為土壤磷檢測方法為基準之水稻磷鉀肥推薦量

土壤 pH	土壤檢測磷 (kg/ha)	土壤檢測鉀量(kg/ha)		
		≦140	140-200	＞200
		P_2O_5-K_2O 的推薦量(kg/ha)		
＜ 6.5	≦35	20-100	20-65	20-0
	＞35	0-100	0-65	0-0
＞ 6.5	≦35	65-100	65-65	65-0
	35-55	45-100	45-65	45-0
	＞55	0-100	0-65	0-0

4.5 土壤中植株養分的需求水準

表 20、基於土壤總氮含量之水稻氮需求性

總氮量(g/kg)	氮施用的需求性
＜1	高
1-2	中
＞2	低

表 21、基於土壤有效性氮含量之水稻氮需求性

有效性氮(mg/kg)	氮施用的需求性
50-100	高
100-200	中
＞200	低

表 22、基於土壤檢測之水稻對磷需求性

有效性磷(Olsen, mg/kg)	磷施用的需求性
＜5	高
5-10	中
＞10	低

表 23、基於土壤檢測之水稻鉀需求性

交換性鉀(cmol(+)/kg soil)	鉀施用的需求性
＞0.2	低

使用土壤分析對於稻田土壤微量元素的臨界限值，如表 24 所示。

表 24、稻田土壤微量元素的缺乏臨界濃度

元素	檢測方法	臨界濃度(mg/kg)
鐵(Fe)	DTPA+$CaCl_2$(pH 7.3)	2.5-4.5
	$NH_4C_2H_3O_2$(pH 4.8)	
錳(Mn)	DTPA+$CaCl_2$(pH 7.3)	1.0
	0.1N H_2PO_4& 3 N $NH_4H_2PO_4$	15-20
銅(Cu)	DTPA+$CaCl_2$(pH 7.3)	0.2
鋅(Zn)*	0.5 N HCl	1.5
	Dithizone+ $NH_4C_2H_3O_2$	0.3-2.2
	EDTA+$(NH_4)_2CO_3$	1.5
	DTPA+$CaCl_2$(pH 7.3)	0.5-0.8
硼(B)	熱水抽出法	0.1-0.7
鉬(Mo)	$(NH_4)_2(C_2O_4)$ (pH 3.3)	0.04-0.2

摘自 S.K. De Datta, 1989

*：假如土壤 pH＞6.8, 鋅的缺乏症狀大部分容易發生, 特別是水稻品種特別敏感和低鋅的利用效率

4.6 養分吸收與轉運

應清楚的瞭解作物於不同生長期的生長與發育之營養的需求，在一些重要的生長期必須要有先前的必需量作為養分的管理，以待生育代謝的進行。

以氮為例，水稻在生長初期間期營養體的氮累積是相當高，隨著至生長後期而減少。氮的轉運從營養器官轉至穀粒，自開花後才特別顯著。碳水化合物的轉運從營養部位轉運至穀粒也是自開花後，並大量的碳水化合物累積於穀粒中。蛋白質的合成在營養生長期與生殖生長期是非常活躍，此時細胞壁物質(纖維素、木質素等)的合成也很活躍。只有在成熟期澱粉的合成才變得活躍。

水稻中**養分的移動**速率是 P＞N＞S＞Mg＞K＞Ca。這些要素是隨形成立即需求的蛋白質而有高的移動速率，且同時持續被吸收直到老化時移動速率才變慢。因此，構成蛋白質的要素，如氮、磷與硫是等，在活躍的營養生長期吸收是快速的，隨之在開花期後被轉運至穀粒。其他的要素如鈣和鉀是配合乾物質的生長速率而於整個生長周期被吸收。

4.7 不同生長期的養分吸收

- 氮、磷、鉀的濃度在秧苗期時隨生長期而日益增加直到最大值時而降低。
- 植株的氮濃度在移植後以最低限度的減少，然後，直到開花初期又增加。隨之氮濃度持續的減少直至糊熟期保持穩定的濃度至成熟。
- 磷的濃度則在插秧後快速減少，然後，緩慢的增加至開花時達高峰，再又減少至糊熟期。
- 鉀與鈣的濃度於生長早期是逐漸地減少但從開花後增加直至成熟。
- 插秧後至分蘖中期鎂的濃度是高的，隨後逐漸降低。
- 硫濃度隨生長期降低。

5. 礦質態營養的推薦

精確的肥培管理方案，它必須參照品種、土壤與水分條件及生產者的管理經驗而定。至於考慮區域性的環境條件，詳細的地區性的肥料推薦將以各區改良場的論述為主。

5.1 土壤與葉片組織分析

5.2.1 土壤分析

種植前分析土壤和生長季間分析葉片組織，協助瞭解水稻即時之養分需求性，是最理想的肥料推薦系統。

對田間研究人員需要藉由土壤檢測的分析值判斷磷、鉀和鋅水稻利用的臨界濃度。這些臨界濃度一般結果是以水稻的最高生長或稻穀產量減產 10%訂定。當土壤的檢測值接近或低於臨界值時，缺乏要素的施用將可預防產量減少。因此，適當的土壤採樣、化學分析與解釋可幫助避免植物營養的缺乏，也是土壤管理的有效指標。

5.2.2 葉片分析

植物組織的分析對生長作物營養狀態的診斷是必要的。植物組織分析提供季中氮的施用指標和隨之而來水稻對預期氮磷鉀的施用。植物組織分析值決定於具代表性的採樣、選擇適合的植株部位、最近成熟的全葉片，也就是 Y 型葉，樣本經乾燥與處理、分析，最後正確的說明養分濃度與水稻生長與產量間的關係。

5.2 土壤氮磷鉀的施用

氮適當氮肥施用的量主要決定於品種和土壤類型，如表 14，一般施用總量的範圍是比較寬廣，兩個方法(approaches)：

- 不建議當已確定的品種在不良的水分管理條件下，立即簡單的農田預先浸水，隨即施用預計的全氮量。
- 分次施用，將總氮量分成三次施用，早期大約施用總氮量的 20-30%，剩下的 80-70%則以色板觀測葉片的顏色決定作物的需要，依照作物的需要分成二次施用。(圖 19)

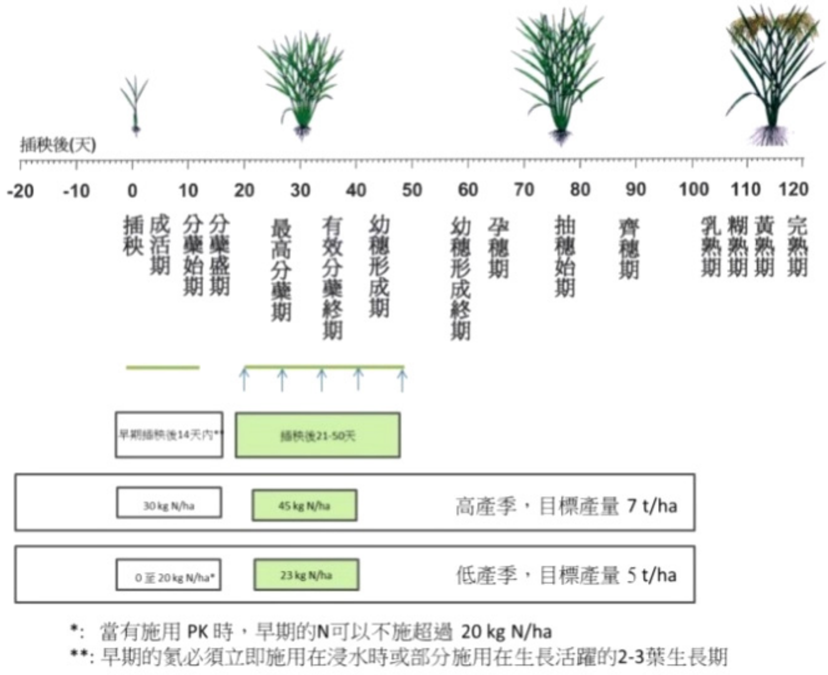


圖 19、氮肥分施推薦的例子

磷

磷的施用時機是影響水稻磷營養的關鍵因子。缺磷土壤磷肥的施用必須施用在浸水前，因為水稻磷於整個生長季均吸收以供應乾物質的生產。對水稻而言，每生產 50kg 的稻穀將移走 0.35 kg 的 P_2O_5，配合土壤磷檢測值，最低是 35 和高於 55 kg/ha，推薦的磷肥是參照田間移除的磷量。

表 25、以 Mehlich 3 為土壤磷檢測基準之水稻磷肥推薦量

土壤 pH	土壤檢測磷 (kg/ha)	P_2O_5 推薦施用量 (kg/ha)
＜ 6.5	≦35	20
	＞35	0
＞ 6.5	≦35	70
	35-55	45
	＞55	0

鉀

一般氮磷鉀推薦量是假設收穫後稻草回田循環利用的管理方式，如果稻草不回田時，當產量是 6.5 t/ha 和 5.5 t/ha，K_2O 需要的量分別是 153 及 121 kg/ha。

鉀肥的施用是在鉀缺乏症狀出現前，只有在較低產量的收益時，期望藉由鉀肥的施用在中後期抽穗期容易缺乏鉀時，提供鉀。鉀的施用對當季水稻可能有助益，也可保留於土壤中供給下季作物使用。

坋質與砂質壤土有較低的土壤緩衝能力，如果連續幾作作物不施鉀，將造成土壤檢測的鉀快速減少。一般粗質地的土壤為容易缺鉀的土壤。

表 26、以 Mehlich 3 為土壤鉀檢測基準之水稻鉀肥推薦量

土壤檢測鉀量 (kg/ha)	≦140	140-200	＞200
推薦的鉀肥量 (K_2O, kg/ha)	100	65	0

建議推薦之鉀肥全量在插秧前用表面撒施和全層施用。假如鉀肥於插秧前沒施用，也可於永久浸水系統還沒建立前施用。其中分次施也是常見的施鉀肥方式。

過去所作的田間水稻試驗應用於我國農田土壤資訊庫建立水稻田土壤分級、管理要點及推薦的磷鉀肥量，如圖 20 與 21 及表 27 與 28 所示。綜合磷鉀肥的推薦，則如表 29 所示。

表 27、修訂之稻田土壤磷檢測值與管理要點

土壤 pH	土壤檢測磷			養分等級與管理要點
	水準	mg/kg	kg/ha	
＞6.5	非常低	＜18	＜41	磷肥肥效極大
	低	19-35	41-79	磷肥肥效中等
	中	36-55	79-124	磷肥肥效小
	適合	56-85	124-191	栽培條件無法達目標產量，可不施磷肥
	高	＞85	＞191	無明顯肥效
＜6.5	低	＜18	＜41	磷肥肥效中等
	中低	19-35	41-79	栽培條件佳時，可酌施磷肥
	中	36-55	79-124	磷肥肥效小，考慮成本可不施磷肥
	適合	56-85	124-191	栽培條件無法達目標產量，可不施磷肥
	高	＞85	＞191	無明顯肥效

(江志峯，2016)

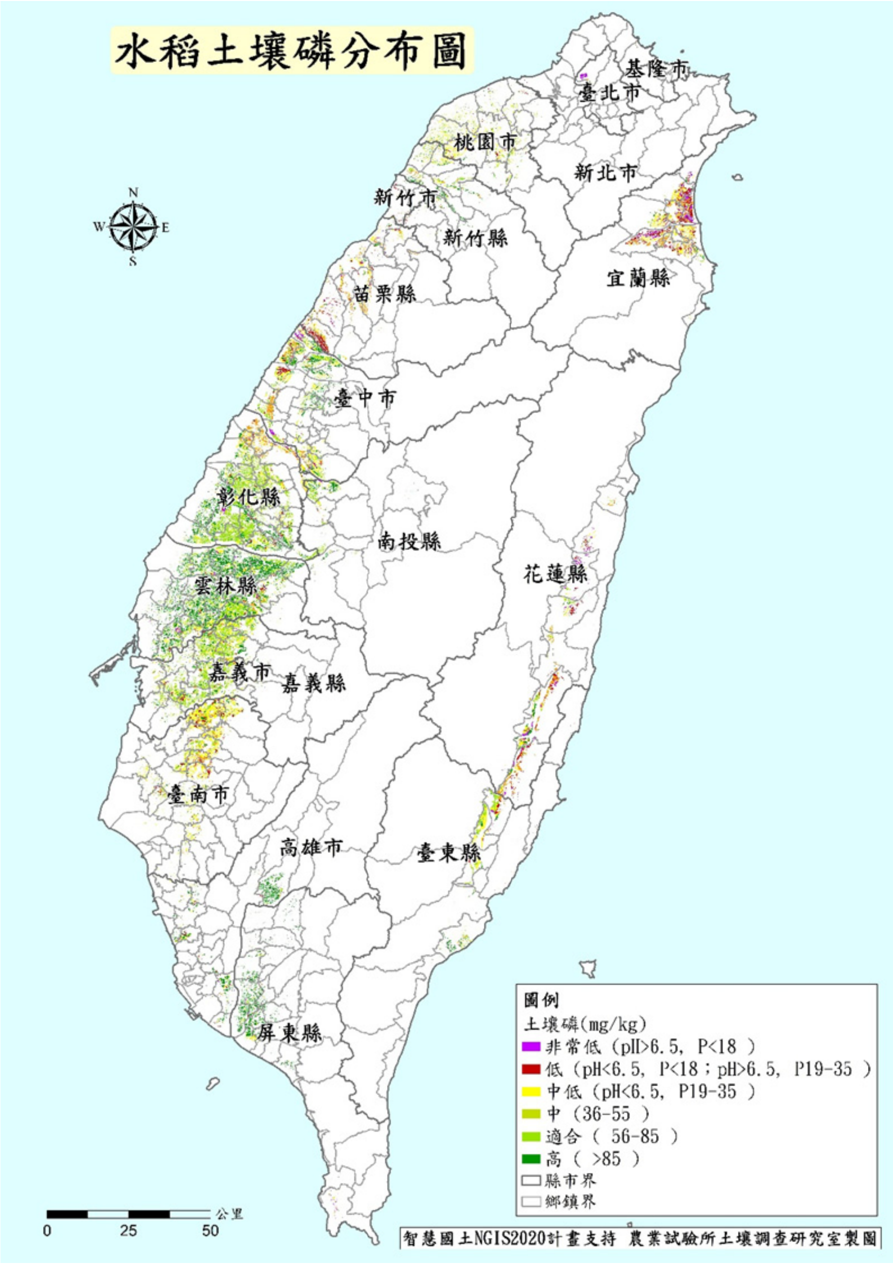


圖 20、稻田土壤磷檢測水準分佈與磷肥管理圖

表 28、修訂之稻田土壤鉀檢測(Mehlich 3)與管理要點

土壤檢測鉀量			養分等級與管理要點
水準	mg/kg	kg/ha	
非常低	＜61	＜137	鉀肥肥效極大
低	62-90	137-200	鉀肥肥效中等
中	91-130	201-290	鉀肥肥效小
適合	131-175	291-390	栽培條件無法達目標產量，可不施鉀肥
高	＞175	＞390	無明顯肥效

(江志峯，2016)

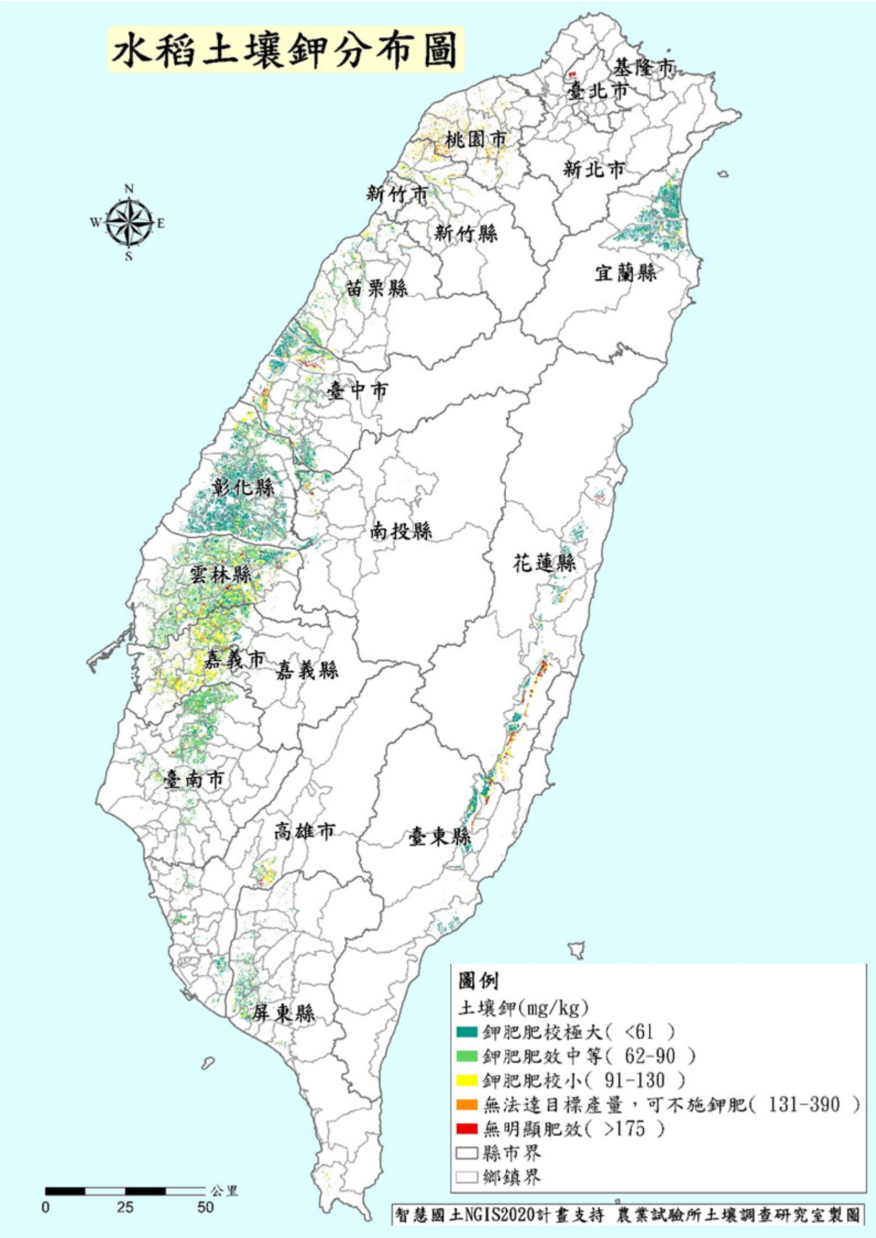


圖 21、稻田土壤鉀檢測水準分佈與鉀肥管理圖

表 29、稻田土壤磷鉀檢測值與磷鉀肥推薦量

土壤 pH	土壤磷檢測水準			土壤鉀檢測水準				
				非常低 ＜61 mg/kg ＜137 kg/ha	低 62-90 mg/kg 137-200 kg/ha	中 91-130 mg/kg 201-290 kg/ha	適合 131-175 mg/kg 291-390 kg/ha	高 ＞175 mg/kg ＞391 kg/ha
	水準	mg/kg	kg/ha	P_2O_5-K_2O(kg/ha)				
＞6.5	非常低	＜18	＜41	100-135	100-100	100-70	100-0	100-0
	低	19-35	41-79	70-135	70-100	70-70	70-0	70-0
	中	36-55	79-124	55-135	55-100	55-70	55-0	55-0
	適合	56-85	124-191	0-135	0-100	0-70	0-0	0-0
	高	＞85	＞191	0-135	0-100	0-70	0-0	0-0
＜6.5	非常低	＜18	＜41	55-135	55-100	55-70	35-0	55-0
	低	19-35	41-79	35-135	35-100	35-70	35-0	35-0
	中	36-55	79-124	0-135	0-100	0-70	0-0	0-0
	適合	56-85	124-191	0-135	0-100	0-70	0-0	0-0
	高	＞85	＞191	0-135	0-100	0-70	0-0	0-0

(江志峯，2016)

5.3 次微量元素土壤檢測與管理要點

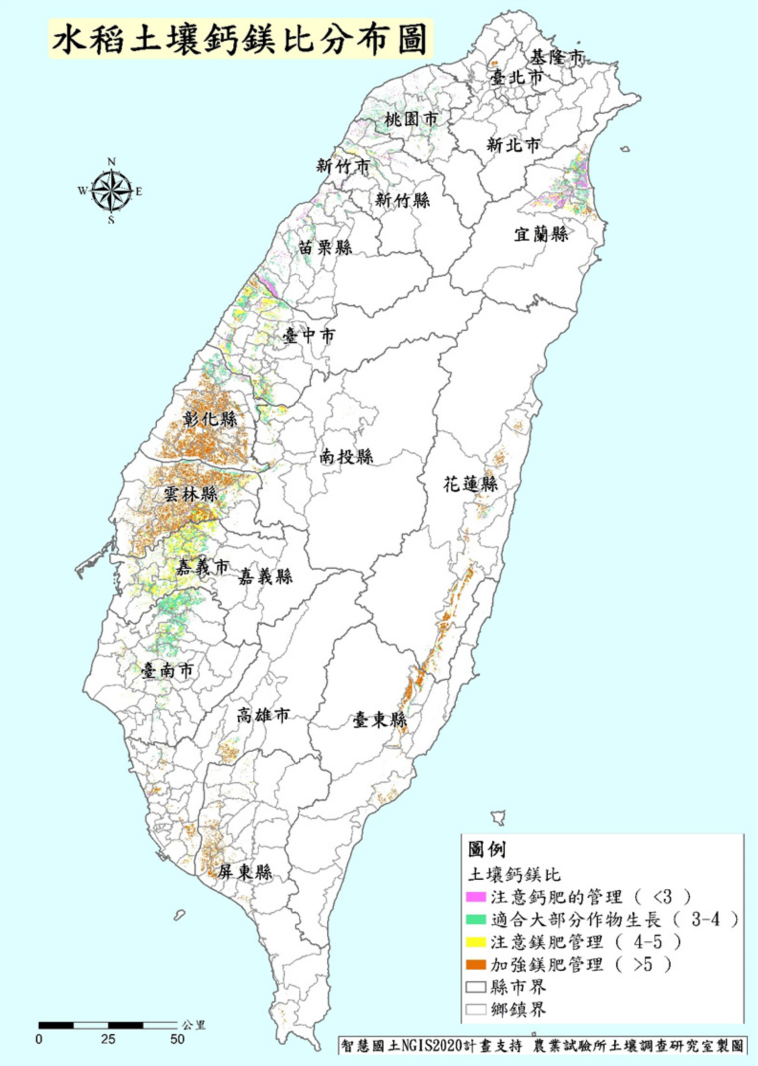


圖 21、稻田土壤鈣鎂檢測水準分佈與管理圖

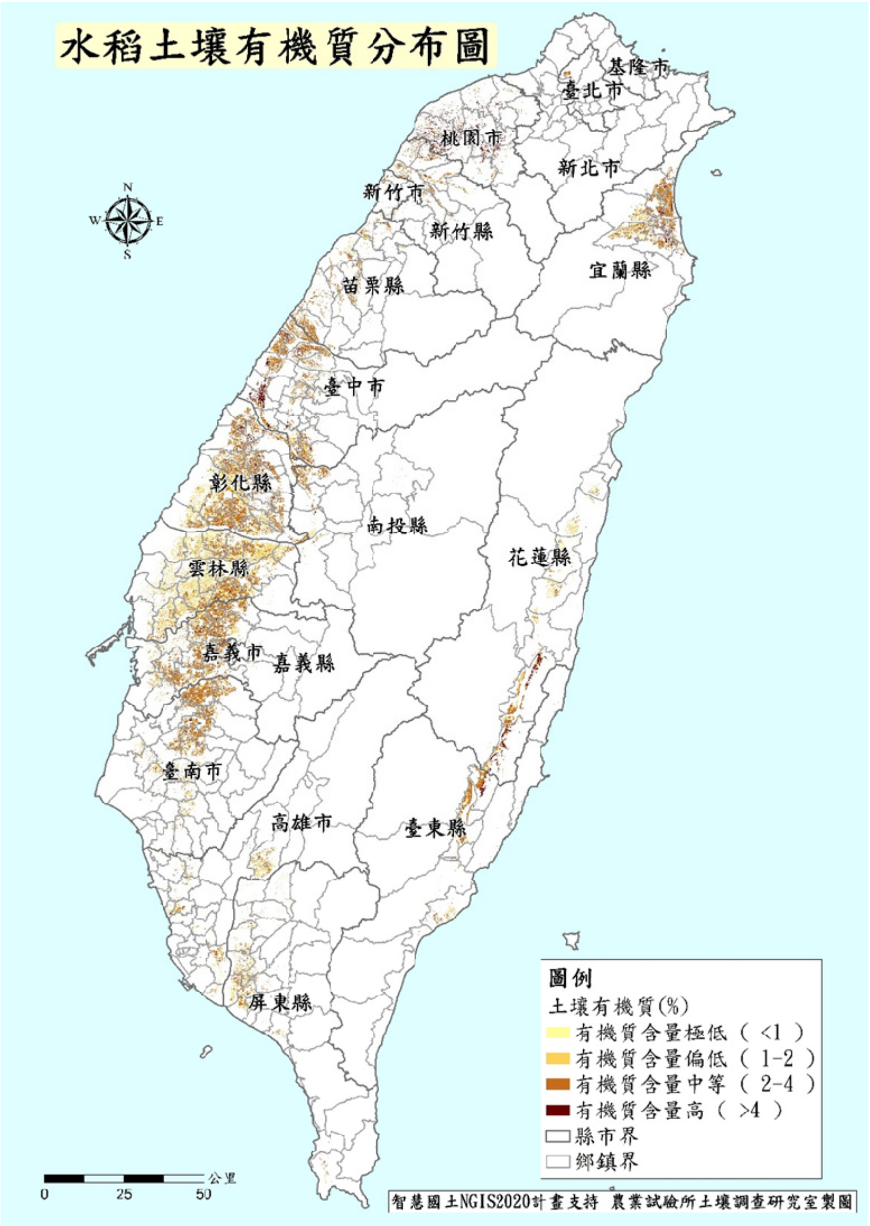


圖 22、稻田土壤有機質檢測水準分佈圖

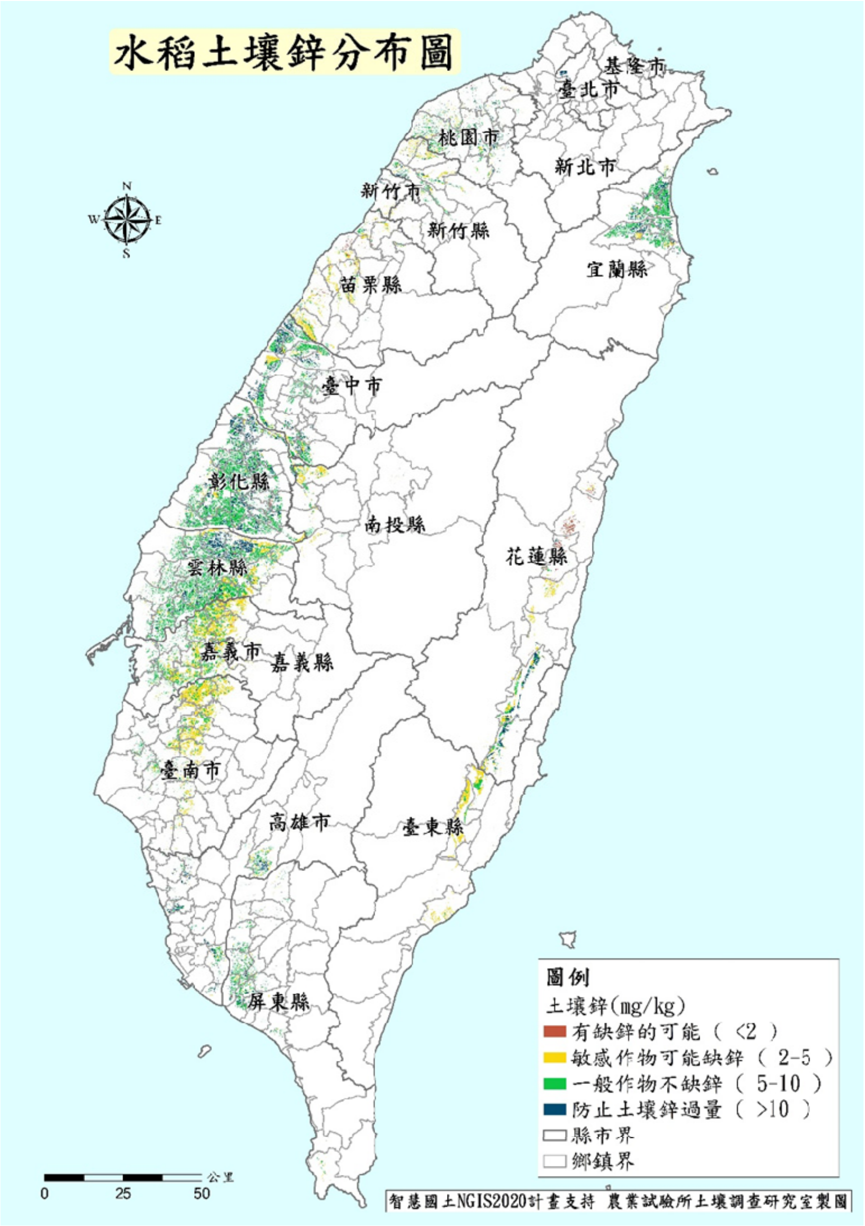


圖 23、稻田土壤鋅檢測水準分佈與管理圖

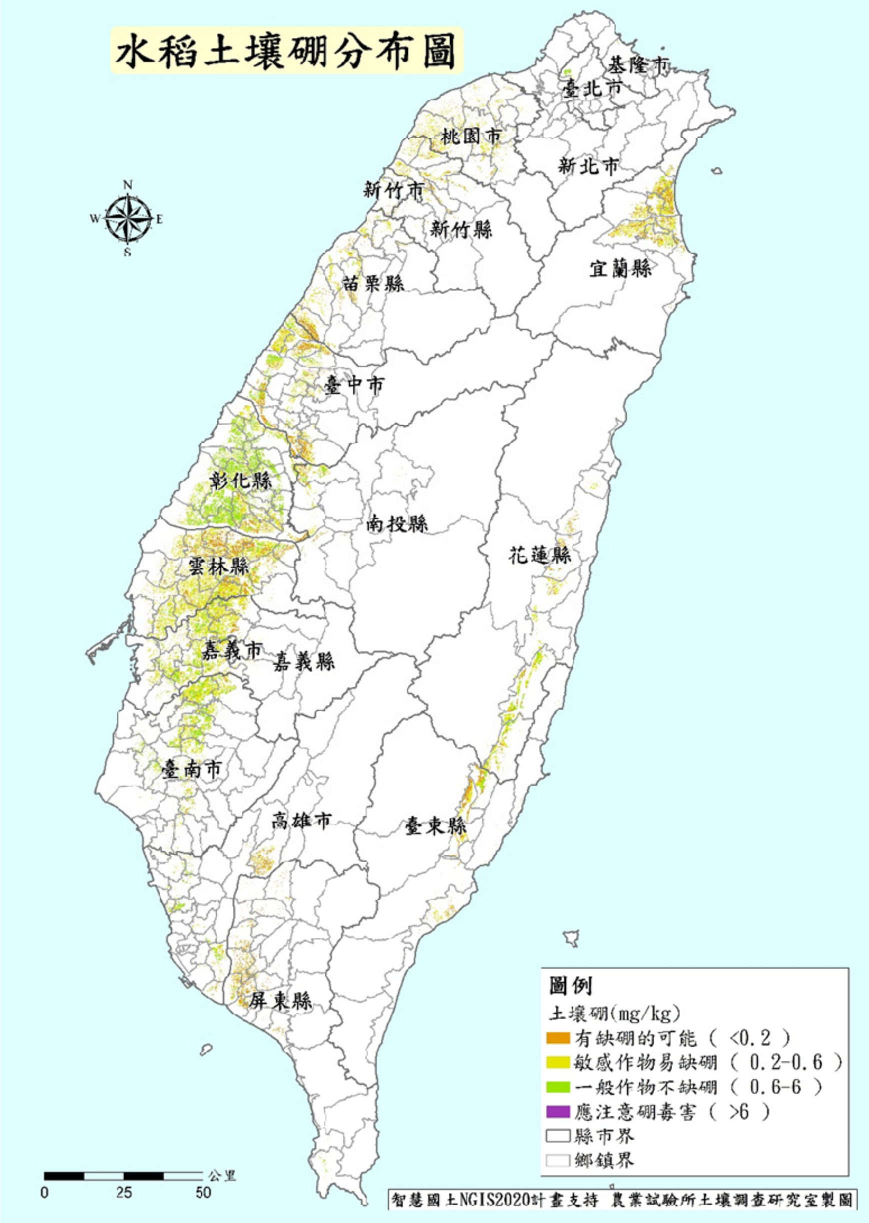


圖 24、稻田土壤硼檢測水準分佈與管理圖

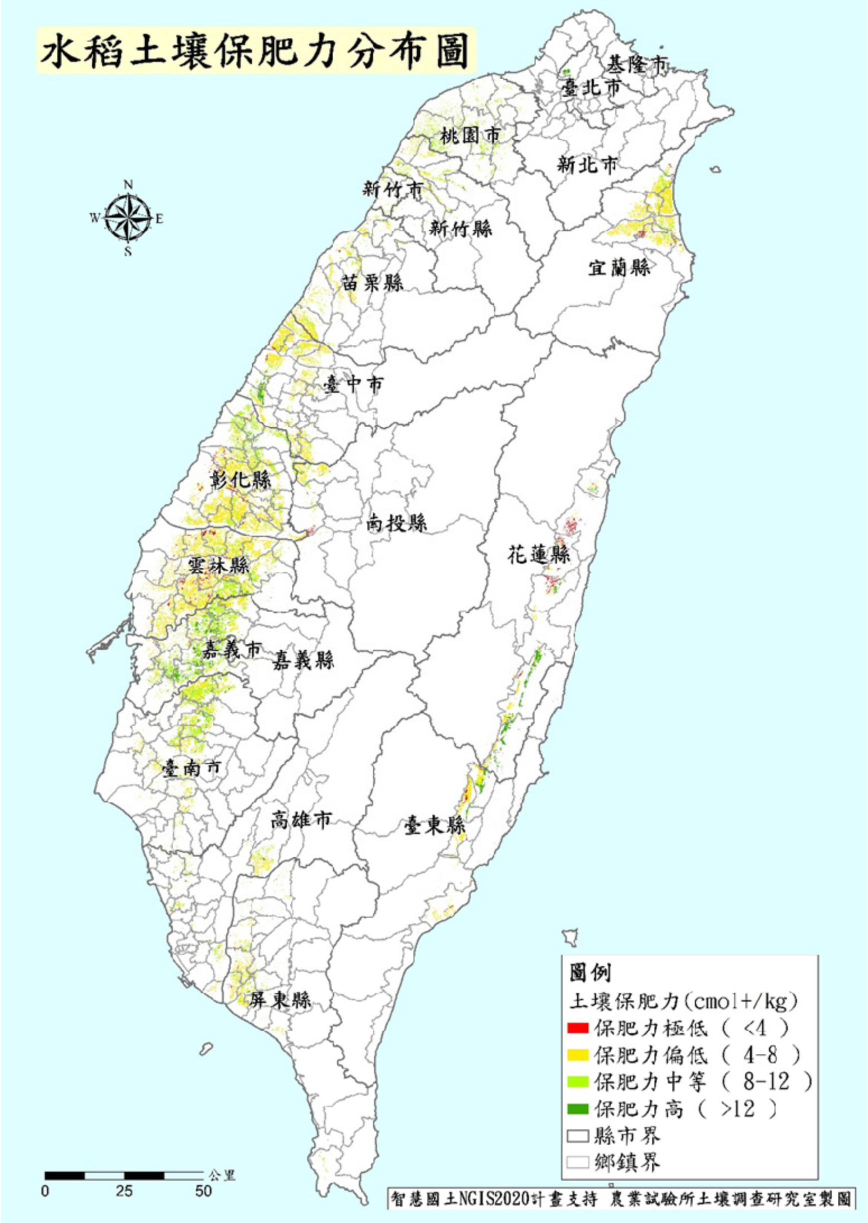


圖 25、稻田土壤陽離子交換容量(CEC)檢測水準分佈與礦質元素管理圖

6. 區域施肥推薦技術

在特定的目標區域內建立推薦施肥方案需要基於一個經過鑑定的推薦區域，推薦區域的確定可藉由瞭解當地農民施肥習慣與社會經濟特點，因為這些特點在選定的區域內決定著作物產量潛力、土壤養分供應以及預期肥料效應之間的關係。推薦區域具備以下特點：

- 具有一個流域邊界;
- 具有共同的種植體系與農時規律;
- 相似的灌溉水源;
- 相似的土壤肥力狀況;
- 可能包括若干個行政單位的邊界。

6.1 北桃竹苗地區

6.1.1 北桃竹地區

北桃竹地區土壤性質與水稻施肥參考之資訊

桃園區農業改良場　莊浚釗

桃園區農業改良場新品種桃園3號

具高產、米質優之特性，且具芋香味，商品名稱為新香，極適合北部地區栽種。該品種氮用量及施肥方法，若依據作物施肥手冊(羅，2005)推薦施用，是否符合其生育所需，實有探討之必要。因此，進行對水稻品種桃園 3 號施肥試驗，瞭解氮用量及氮肥分配率對產量及米質之影響，況且根據戴及林(1992)調查農民氮用量約為作物施肥手冊推薦量的一倍，藉以釐訂合理的氮肥施用量及施肥方法，提供農民肥培管理的依據。

氣候時期環境因素影響

水稻生育及產量受環境因素影響甚大(郭等，1985)；北部地區二期作初期因氣溫高，水稻插秧後成活較一期作快，生長亦較快，故其株高較高，但於抽穗期適逢低溫及東北季風吹襲，致使稔實率及產量降低(林等，1994；張，1998)。

氮施用量

水稻產量與氮施用量息息相關(賴等，1997)，莊(2006)指出，高氮肥區較低氮肥區之一、二期稻穀分別增產 2.2 t /ha(42%)及 1.2 t/ ha (21%)。

不同時期的施肥

洪(1979)試驗指出水稻氮肥吸收利用率以生育中、後期較高；譚等(1998)更指出水稻對氮的吸收，一期作以第三次追肥(插秧後約 50 天)吸收率最高，二期作則以第二次追肥(插秧後約 20 天)吸收率最高。

米質檢定

係依美國農業部 Technical Bulletin No.1311 的分級標準(宋和許，1993)，米粒外觀以透明度、心腹白為判斷因素，其值越低則外觀越佳，且數值過高易於碾米過程中造成斷裂；理化性質則以直鏈澱粉及粗蛋白質含量越低，凝膠展延性越高為越佳(劉等，1988；Tashiro and Watdlaw, 1991)，直鏈澱粉含量高時其食味不佳(許和宋，1988)。

稻米碾米品質、米粒外觀及理化性質受環境因素影響甚大；一期作生育後期遇高